ISSN 2078-4481

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК

ХЕРСОНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

3(94)

Частина 1

Рекомендовано до друку Вченою радою
Херсонського національного технічного університету
(протокол № 4 від 28.10.2025 року)

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України
категорії «Б» зі спеціальностей: С1, D1, D2, D3, D5, D7, J3
(Наказ МОН України від 17.03.2020 № 409);
D4 (Наказ МОН України від 29.06.2021 № 735);
J5, J6, J7, J8, F2, F3, F5, F6, F7, G7, G8, G9, G11
(Наказ МОН України від 02.07.2020 № 886);
G1, G3, G4, G15 (Наказ МОН України від 24.09.2020 № 1188)

Журнал включено до наукометричних баз, електронних бібліотек та репозитаріїв:
GoogleScholar, Crossref, National Library of Ukraine (Vernadsky)

Видавничий дім
«Гельветика»
2025

Редакційна колегія

Головний редактор
Литвиненко В. І.
д.т.н., професор, завідувач кафедри інформатики і комп'ютерних наук,
заслужений діяч науки і техніки України

Заступник головного редактора
Сарібєкова Ю. Г.
д.т.н., професор

Шерстюк В. Г.
д.т.н., професор, проректор з навчальної роботи

Відповідальний секретар
Лур'є І. А.
к.т.н., доцент, начальник навчально-методичного відділу, доцент кафедри інформатики і комп'ютерних наук

Члени редакційної колегії

Баганов Є. О.	к.т.н., доцент
Березовський Ю. В.	д.т.н., доцент
Бойко Г. А.	к.т.н., доцент
Вороненко М. О.	к.т.н., доцент
Гончар О. І.	д.е.н., професор
Горбачов П. Ф.	д.т.н., професор
Дімітрова В.	д.н., доцент
Джерелюк Ю. О.	д.е.н., професор
Євтушенко В. В.	к.т.н., доцент
Жарікова М. В.	д.т.н., професор
Зубкова К. В.	к.т.н., доцент
Корчевська Л. О.	д.е.н., професор
Кузьміна Т. О.	д.т.н., професор
Куник О. М.	к.т.н., доцент
Луб'яний П. В.	к.т.н., доцент
Наумов О. Б.	д.е.н., професор
Олійник Н. М.	к.т.н., доцент
Плющ Р. М.	д.держ.упр., професор
Половцев О. В.	д.держ.упр., к.т.н., професор
Рудакова Г. В.	д.т.н., професор
Русанов С. А.	к.т.н., доцент
Савін С. Ю.	д.е.н., доцент
Салєба Л. В.	к.т.н., доцент
Семешко О. Я.	д.т.н., професор
Сідельникова Л. П.	д.е.н., професор
Smolarz A. (Польща)	dr.hab.inz.
Стоянова О. В.	к.т.н., доцент
Топалова Е. Х.	к.держ.упр., доцент
Філіппова В. Д.	д.держ.упр., професор
Хрущ Н. А.	д.е.н., професор
Чепелюк О. В.	д.т.н., професор
Шандова Н. В.	д.е.н., професор
Шарко О. В.	д.т.н., професор
Шарко М. В.	д.е.н., професор
Шевченко І. І.	д.т.н., професор

ISSN 2078-4481

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
KHERSON NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY

VISNYK

OF KHERSON NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY

3(94)

Part 1

Recommended for publication by the Academic Council
of Kherson National Technical University
(Minutes № 4 on 28th October 2025)

The journal is included in the List of Scientific Professional Editions of Ukraine Category “B”
in specialties: C1, D1, D2, D3, D5, D7, J3
(Ukraine Education and Science Ministry Order dated 17.03.2020, № 409);
D4 (Ukraine Education and Science Ministry Order dated 29.06.2021, № 735);
J5, J6, J7, J8, F2, F3, F5, F6, F7, G7, G8, G9, G11
(Ukraine Education and Science Ministry Order dated 02.07.2020, № 886);
G1, G3, G4, G15
(Ukraine Education and Science Ministry Order dated 24.09.2020, № 1188)
The journal is included in the scientometric bases, electronic libraries and repositories:
Google Scholar, Crossref, National Library of Ukraine (Vernadsky)

Publishing House
“Helvetica”
2025

Editorial Board

Editor-in-Chief
Litvinenko V. I.
Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Department of Informatics and Computer Science, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine

Deputy Editor-in-Chief
Saribekova Yu. G.
Doctor of Engineering Science, Professor

Sherstiuk V. H.
DSc (Engineering), Professor, Vice-Rector for Academic Affairs

Executive Secretary
Lurie I. Yu.
PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Educational and Methodical Department, Associate Professor of the Department of Informatics and Computer Sciences

Members of Editorial Board

Baganov Ye. O.	Ph.D., Associate Professor
Berezovsky Yu. V.	Doctor of Engineering Science, Associate Professor
Boiko H. A.	Ph.D., Associate Professor
Voronenko M. O.	Ph.D., Associate Professor
Honchar O. I.	Doctor of Economic Sciences, Professor
Horbachov P. F.	Doctor of Economics, Professor
Dimitrova V. Ya. (Bulgaria)	Ph.D., Associate Professor
Dzhereliuk Yu. A.	Doctor of Economics, Professor
Yevtushenko V. V.	Ph.D., Associate Professor
Zharikova M. V.	Doctor of Engineering Science, Professor
Zubkova K. V.	Ph.D., Associate Professor
Korchevska L. A.	Doctor of Economics, Professor
Kuzmina T. O.	Doctor of Technical Sciences, Professor
Kunyk O. N.	Ph.D., Associate Professor
Lubianyi P. V.	Ph.D., Associate Professor
Naumov O. B.	Doctor of Economics, Professor
Oliinyk N. M.	Ph.D., Associate Professor
Pliushch R. M.	Doctor of Sciences in Public Administration, Professor
Polovtsev O. V.	Doctor of Sciences in Public Administration, Professor
Rudakova H. V.	Doctor of Engineering Science, Professor
Rusanov S. A.	Ph.D., Associate Professor
Savin S. Yu.	Doctor of Economics, Associate Professor
Saleba L. V.	Ph.D., Associate Professor
Semeshko O. Ya.	Doctor of Engineering Science, Professor
Sidelnykova L. P.	Doctor of Economics, Professor
Smolarz A. (Poland)	Ph.D., Associate Professor
Stoianova O. V.	Ph.D., Associate Professor
Topalova E. K.	Ph.D., Associate Professor
Filippova V. D.	Doctor of Science in Public Administration, Professor
Khrushch N. A.	Doctor of Economics, Professor
Chepeliuk O. V.	Doctor of Technical Sciences, Professor
Shandova N. V.	Doctor of Economics, Professor
Sharko M. V.	Doctor of Economics, Professor
Sharko O. V.	Doctor of Engineering Science, Professor
Shevchenko I. I.	Doctor of Technical Sciences, Professor

ЗМІСТ

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

Р. В. Абакумов
Кореляція між культурою code review та рівнем надійності у великих міжнародних інженерних командах……11
Є. Б. Алфімов
Інтеграція малих модульних реакторів у динамічні енергосистеми з високою часткою ВДЕ
та методи керування навантаженням……19
Є. О. Баганов, Н. Л. Дон, І. Ф. Погребняк, О. О. Корнієнко
Світлотехнічні розрахунки мережі освітлення системи електропостачання з використанням моделювання
в DIALux Evo……28
Н. М. Березненко
Еколого-економічний аспект ефективності застосування полімерних композицій,
що біологічно розкладаються з додаванням крохмалю……34
Г. С. Бєлоха, В. О. Музика
Аналіз проблем якості електропостачання в сучасних системах електропостачання……40
Д. О. Василенко, М. С. Сорокін
Вплив електромагнітних полів на точність флуоресцентного аналізу білків у сирних продуктах……49
М. І. Горбійчук, М. З. Василенчук, М. І. Когутяк
Інваріантна система автоматичного керування шляховим нагрівачем нафти……57
А. Г. Данилкович, О. А. Охмат
Оптимізація синтан-танідної композиції для наповнювання еластичного шкіряного матеріалу……70
А. О. Деркаченко, О. В. Поливода
Розробка алгоритму визначення положення платформи сферичного паралельного механізму
в 3D-просторі та його програмна реалізація……79
Н. О. Дорогань, Л. П. Черняк
Дослідження силікатних систем з техногенною сировиною для виготовлення цементу……88
К. М. Думенко, В. Ф. Гарькава, С. М. Пилипенко, О. Б. Звягінцева, О. Ю. Верланов
Актуальні проблеми розвитку транспортних технологій в Україні і світі……96
І. М. Задорожня, М. О. Задорожній
Удосконалення динаміки в електроприводі за умов додаткових зворотних зв'язків
при реалізації ефекту резонансної електромеханічної взаємодії……104
О. В. Іщенко, Р. М. Москаль
Технології одержання екологічного посуду……110
О. В. Іщенко, І. В. Охріменко
Дослідження впливу молекулярної маси гіалуронової кислоти на структурні
та функціональні властивості матеріалу……116
О. В. Канівець, С. В. Попов
Перспективи удосконалення роботи механоскладальних дільниць та забезпечення їх
різальним інструментом у воєнний час……123
А. Ю. Караюмер, А. Д. Кустовська
Біотехнологічний потенціал морських трав родини *Zosteraceae*: цільові компоненти,
методи вилучення та напрями застосування……129
В. І. Копилов, В. В. Петренко, І. А. Сєліверстов
Аналіз енергетичних затрат при формуванні плазмових покриттів і при руйнуванні
в умовах дії навантажень……138
В. В. Крупа, Ю. О. Апостол, Ю. І. Щербань, О. С. Тарапата
Дослідження параметрів процесу та шорсткості поверхні при свердлінні гартованої легованої сталі
гарматним свердлом……149
В. В. Курак, О. В. Андронова
Техніко-економічні показники мережевих фотоелектричних станцій з модулями різних типів
в кліматичних умовах Херсонської області……160

С. В. Ляшенко, А. О. Келемеш, О. А. Бурлака, В. В. Лавренко
Покращення техніко-експлуатаційних характеристик гільз гідроциліндрів автомобільно-тракторної техніки шляхом застосування термомеханічного зміцнення для удосконалення технології їх відновлення……165
О. В. Ляшко, В. М. Лазорик, І. А. Сєліверстов
Механохімічне легування композитних порошків Al-Si-hBN для нанесення ущільнюючих плазмових покриттів……177
О. Є. Маляренко
Тенденції заміщення викопного палива альтернативними видами та відновлюваними джерелами енергії в Україні……183
М. В. Немченко
Зменшення втрат при очищенні зерна пшениці за умов експлуатації машинно-тракторного парку фермерського господарства……193
В. М. Орел
Аналіз технологій механічної обробки деталей адитивного виробництва в інженерних системах……201
С. В. Попов
Визначення оптимальних режимів шліфування різального інструменту методом планування експерименту…213
Б. І. Приймак
Система автоматичного керування асинхронним електроприводом з покращеними енергетичними характеристиками……220
І. В. Радяк, Б. Я. Бакай
Аналіз поперечних коливань стріли маніпулятора з використанням методу Релея ……227
М. В. Роганін, О. О. Гончаренко
Моделювання процесів зносу і відновлення твердосплавних сталей для прогнозування довговічності деталей……236
О. М. Роїк, О. В. Іщенко, Г. І. Кузьміна, А. В. Владі
Розробка складу гідрогелевих патчів з екстрактом комбучі для догляду за шкірою під очима……245
О. І. Россомаха, Л. В. Пізінцалі, Г. Г. Томчаковський, О. А. Россомаха, Н. І. Александровська
Енергоефективність суден як інструмент зменшення викидів: сучасні практики, міжнародні та національні виклики……252
Н. П. Соколова, І. В. Прохоренко, Н. А. Тимошенко, Т. А. Мазур
Сучасні системи моніторингу та обліку електроенергії……263
М. І. Солод
Дослідження забруднень ґрунтів внаслідок військово-антропогенних впливів……269
Д. М. Степанчиков, Н. Л. Дон
Застосування принципу максимуму ентропії у вітроенергетиці……274
Ye. V. Trachuk, M. P. Shved
Analysis of the influence of polymer melt viscoelastic properties on the mixing quality in a disk extruder calculation……282
С. М. Форись, А. Ю. Усенко, В. Я. Перерва
Рекуперація низькопотенційного тепла технологічних процесів для автономного енергозабезпечення підприємств……292
В. І. Холденко
Оцінка впливу експлуатаційних навантажень на знос деталей суднового насосного обладнання……301
Ю. Ф. Холодний, В. О. Жовтобрюх, Р. О. Іваненко
Моделювання механічних систем для підвищення довговічності конструкцій……307
А. М. Чеверда, Н. Я. Данилюк
Взаємодія BIM-технологій з існуючими методами інформаційної підтримки у нафтогазовій галузі……316
О. В. Шевченко
Методи забезпечення вібростійкості пружної системи інструменту токарного верстата……328

ТЕХНОЛОГІЯ ЛЕГКОЇ ТА ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Т. С. Асаулюк, Ю. Г. Сарібєкова, І. М. Куліш, І. В. Горохов, О. Я. Семешко
Вплив модифікації органосіланом на властивості поверхні синтезованих наночастинок ZnO……336
О. А. Гібелінда, Ю. Г. Сарібєкова
Вплив сучасного завершального оброблення на технологічні характеристики трикотажних полотен……343
Є. О. Калінський, О. Воронко
Удосконалення акустичного методу визначення якості лубовокнистої сировини……348
О. М. Камінський, Р. О. Денисюк, М. В. Чайка, С. В. Кучерук, Д. Ю. Панасюк, О. В. Анічкіна, О. Ю. Авдєєва, Ю. В. Лисецька
Процеси сорбції іонних форм нікелю(II) з водних розчинів нанорозмірним магнетитом……354
Н. В. Кузіна, Л. П. Чертенко, В. П. Кернеш, Т. М. Липський
Стан, виклики та перспективи індивідуального виготовлення ортопедичного взуття в Україні в умовах війни……361
О. В. Нємініч, Д. Б. Рахметов, Р. Ю. Дорошкевич
Фітохімічний профіль летких сполук насіння Nigella та його значення для харчової промисловості……373

УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ

Т. В. Устік, О. М. Сороколіт
Впровадження цифрових маркетингових інструментів для просування органічної продукції в умовах сталого розвитку……385

ПУБЛІЧНЕ УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ

О. П. Зубаль
Реалізація концепції Good Governance в Україні: аналітичний зріз міжнародних індексів……393
Я. І. Мандрик
Сучасні підходи у формуванні управлінців нафтогазової індустрії України……404
К. М. Наумчук, Т. М. Тростенюк
Оцінка ефективності державного управління як важливої демократичної складової в сучасних умовах……410
О. В. Половцев, О. П. Зубаль
Цілісна профорієнтаційна система як один з основних аспектів ефективного управління людськими ресурсами……416
Є. І. Таран
Механізми державного регулювання безпековим потенціалом регіонів в умовах післявоєнного відновлення……426

АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ ТЕХНІЧНИХ НАУК

М. А. Гриньов, О. В. Стрельцов
Межі пасивної діагностики зміщення сенсора за одночасних змін середовища та об’єкта……433

CONTENTS

ENGINEERING SCIENCES

R. V. Abakumov
Correlation between code review culture and reliability in large international engineering teams……11
I. B. Alfimov
Integration of small modular reactor into dynamic power distribution systems
which incorporates multiple renewable energy generation sources and load management methods……19
Ye. A. Baganov, N. L. Don, I. F. Pogrebniak, O. O. Korniienko
Lighting calculations of lighting networks power supply systems using modeling in dialux EVO……28
N. M. Bereznenko
Ecological and economic aspect of the efficiency of the application of polymer compositions
that are biodegradable with the addition of starch……34
H. S. Bielokha, V. O. Muzyka
Analysis of power supply quality issues in modern electrical systems……40
D. O. Vasylenko, M. S. Sorokin
Influence of electromagnetic fields on the accuracy of protein fluorescence analysis in cheese products……49
M. I. Horbiichuk, M. Z. Vasylenchuk, M. I. Kohutiak
Invariant automatic control system for oil road heater……57
A. H. Danylkovych, O. A. Okhmat
Optimization of a syntan-tannin composition for filling elastic leather material……70
A. O. Derkachenko, O. V. Polyvoda
Development of an algorithm for determining the position of a spherical parallel mechanism platform
in 3D space and its software implementation……79
N. O. Dorogan, L.P. Chernyak
Research of silicate systems with technogenic raw materials for cement production……88
K. M. Dumenko, V. F. Harkava, S. M. Pylypenko, O. B. Zviahintseva, O. Yu. Verlanov
Current problems of development of transport technologies in Ukraine and the world……96
I. M. Zadorozhnia, M. O. Zadorozhnii
Improvement of dynamics in electric drives under conditions of additional feedback loops
when implementing the effect resonant electromechanical interaction……104
O. V. Ishchenko, R. M. Moskal
Technologies for producing eco-friendly tableware……110
O. V. Ishchenko, I. V. Okhrimenko
Research on the effect of the molecular weight of hyaluronic acid on the structural and functional properties
of the material……116
O. V. Kanivets, S. V. Popov
Prospects for improving the work of mechanical assembly sections and providing them with cutting tools
in martial law……123
A. Yu. Karaiumer, A. D. Kustovska
Biotechnological potential of seaweeds of the zosteraceae family: target components, extraction methods
and directions of application……129
V. I. Kopylov, V. V. Petrenko, I. A. Sieliverstov
Analysis of energy costs in the formation of plasma coatings and in destruction under load conditions……138
V. V. Krupa, Yu. O. Apostol, Yu. I. Shcherban, O. S. Tarapata
Study of process parameters and surface roughness when drilling hardened alloy steel with a gun drill……149
V. V. Kurak, O. V. Andronova
Technical and economic parameters of grid-connected photovoltaic stations with modules
of different types in climatic conditions of Kherson region……160
S. V. Liashenko, A. O. Kelemesh, O. A. Burlaka, V. V. Lavrenko
Improvement of the technical and operational characteristics of hydraulic cylinder liners of automotive
and tractor machinery by applying thermomechanical strengthening to enhance their restoration technology……165

O. V. Liashko, V. M. Lazoryk, I. A. Sieliverstov
Mechanochemical alloying of Al-Si-hBN composite powders for application of sealing plasma coatings……177
O. Ye. Maliarenko
Trends in replacement of fossil fuel with alternative and renewable energy sources in Ukraine……183
M. V. Nemchenko
Reducing grain losses during wheat cleaning under the operation of a farm's machine and tractor fleet……193
V. M. Orel
Analysis of mechanical processing technologies for additive manufacturing parts in engineering systems……201
S. V. Popov
Determination of the optimal grinding modes for cutting tools using the planning method of experiment……213
B. I. Pryymak
Automatic control system of induction motor drive with improved energy characteristics……220
I. V. Radiak, B. Ya. Bakay
Rayleigh-based analysis of transverse vibrations in a manipulator boom……227
M. V. Rohanin, O. O. Honcharenko
Modeling of wear and restoration processes of hard-alloy steels for predicting the durability of machine parts……236
O. M. Roik, O. V. Ishchenko, G. I. Kuzmina, A. V. Vladi
Development of the composition of hydrogel patches with kombucha extract for skin care under the eyes……245
O. I. Rossomakha, L. V. Pizintsali, G. G. Tomchakovsky, O. A. Rossomakha, N. I. Aleksandrovska
Energy efficiency of ships as a tool for reducing emissions:
current practices, international and national challenges……252
N. P. Sokolova, I. V. Prokhorenko, N. A. Tymoshenko, T. A. Masur
Modern electricity monitoring and accounting systems……263
M. I. Solod
The reasearch on soil contamination due to military-anthropogenic influences……269
D. M. Stepanchikov, N. L. Don
Application of the maximum entropy principle to wind power industry……274
Ye. V. Trachuk, M. P. Shved
Analysis of the influence of polymer melt viscoelastic properties on the mixing quality
in a disk extruder calculation……282
S. M. Forys, A. Yu. Usenko, V. Ya. Pererva
Recuperation of low-grade heat from technological processes for autonomous energy supply of enterprises……292
V. I. Kholdenko
Assessment of the impact of operating loads on the wear of parts of ship pumping equipment……301
Yu. F. Kholodnyi, V. O. Zhovtobryukh, R. O. Ivanenko
Modeling of mechanical systems to improve the durability of structures……307
A. M. Cheverda, N. Ya. Danylyuk
Interaction of BIM-technologies with existing methods of information support in the oil and gas industry……316
O. V. Shevchenko
Methods of ensuring vibration resistance of the elastic system of the lathe tool……328

THE TECHNOLOGY OF LIGHT AND FOOD INDUSTRY

T. S. Asaulyuk, Yu. G. Saribyekova, I. M. Kulish, I. V. Horokhov, O. Ya. Semeshko
Effect of organosilane modification on the surface properties of synthesized ZnO nanoparticles……336
O. A. Hibelinda, Yu. G. Saribyekova
The influence of modern finishing on the technological characteristics of knitted fabrics……343
E. O. Kalinsky, O. Voronko
Improvement of acoustic method for determining the quality of bast fiber raw materials……348
O. M. Kaminskiy, R. O. Denysiuk, M. V. Chayka, S. V. Kucheruk, D. Yu. Panasiuk, O. V. Anichkina, O. Yu. Avdieieva, Yu. V. Lysetska
Processes of sorption of ionic forms of Nickel(II) from aqueous solutions by nanosized magnetite……354

N. V. Kuzina, L. P. Chertenko, V. P. Kernesh, T. M. Lypskyi
Orthopedic manufacturing in Ukraine during wartime: current state, challenges, and prospects for custom orthopedic footwear production……361
O. V. Nemirich, D. B. Rakhmetov, R. Yu. Doroshkevych
Phytochemical profile of volatile compounds of nigella seeds and its significance for the food industry…… 373

MANAGEMENT AND ADMINISTRATION

T. V. Ustik, O. M. Sorokokit
Implementation of digital marketing instruments for the promotion of organic products under sustainable development conditions……385

PUBLIC MANAGEMENT AND ADMINISTRATION

O. P. Zubal
Implementation of good governance concept in ukraine: an analytical overview of international indices……393
Ya. I. Mandryk
Modern approaches in forming managers of the oil and gas industry of Ukraine…… 404
K. M. Naumchuk, T. M. Trosteniuk
Assessment of the efficiency of public administration as an important democratic component in modern conditions……410
O. V. Polovtsev, O. P. Zubal
Comprehensive guidance system as one of the main aspects of effective human resource management…… 416
Ye. I. Taran
The role of regional security potential management in the transformation of national security policy…… 426

CURRENT ISSUES OF TECHNICAL SCIENCES

M. A. Hrynyov, O. V. Streltsov
Limits of passive sensor offset diagnosis under simultaneous environment and plant changes……433

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 004.415.2:004.41:005.32 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.1

Р. В. АБАКУМОВ
інженер-програміст, DispatchHealth Management, LLC, Денвер, США
ORCID: 0009-0004-2743-3815

КОРЕЛЯЦІЯ МІЖ КУЛЬТУРОЮ CODE REVIEW ТА РІВНЕМ НАДІЙНОСТІ У ВЕЛИКИХ МІЖНАРОДНИХ ІНЖЕНЕРНИХ КОМАНДАХ

У статті представлено ґрунтовний аналіз кореляції між культурою рецензування коду та рівнем надійності у великих міжнародних інженерних командах. Застосовуючи міждисциплінарний підхід, що проводить широкі паралелі між програмною інженерією та науковим методом, аргументовано, що такі ключові інженерні практики, як code review, є прямими аналогами академічного рецензування (peer review), які забезпечують колективну верифікацію та підвищення достовірності програмного коду. Цей підхід дає змогу переосмислити процес розробки як постійний цикл висування гіпотез, експериментальної перевірки та колективного аналізу, що веде до системного поліпшення якості. Проведене дослідження показало, що code review має не лише очевидний технічний вплив, пов'язаний зі зниженням кількості дефектів, виявленням архітектурної ерозії та підвищенням читабельності коду, але й глибоке культурне значення, що сприяє формуванню довіри, покращенню комунікації та створенню колективної відповідальності за якість програмного продукту, що є особливо важливим в умовах роботи розподілених команд. На основі окреслених складних взаємозв'язків розроблено модель, яка візуалізує причинно-наслідкові зв'язки, демонструючи, як зріла культура рецензування безпосередньо діє на ключові метрики надійності, зокрема на частоту відкатів та кількість критичних інцидентів, що виникають після релізу. Результати дослідження мають вагоме практичне значення для менеджерів та інженерних команд, оскільки підкреслюють, що інвестування в організаційну культуру, яка підтримує відкрите та конструктивне рецензування, є переломним фактором для гарантування довгострокової стабільності та якості програмного продукту, перетворюючи його з технічного процесу на фундаментальний атрибут успішної інженерної практики. Отже, зазначена модель втілює універсальний інструмент для оцінювання та покращення ефективності роботи команд, орієнтуючись на культуру як на основний драйвер надійності.

Ключові слова: *рецензування коду, якість програмного забезпечення, культура розробки, командна взаємодія, метрики надійності, розподілені команди, міждисциплінарний підхід.*

R. V. ABAKUMOV
Software Engineer, DispatchHealth Management, LLC, Denver, USA
ORCID: 0009-0004-2743-3815

CORRELATION BETWEEN CODE REVIEW CULTURE AND RELIABILITY IN LARGE INTERNATIONAL ENGINEERING TEAMS

This article presents an in-depth analysis of the correlation between code review culture and reliability in large international engineering teams. Using an interdisciplinary approach that draws broad parallels between software engineering and the scientific method, it argues that key engineering practices such as code review are direct analogues of academic peer review, providing collective verification and enhancing the credibility of software code. This perspective makes it possible to reconceptualize the development process as a continuous cycle of hypothesis generation, experimental testing, and collective analysis that leads to systematic quality improvement.

The study shows that code review exerts not only an obvious technical impact, including the reduction of defects, the detection of architectural erosion, and the improvement of code readability, but also a deep cultural influence. It fosters trust, strengthens communication, and establishes collective responsibility for software quality, which is especially critical in distributed teams. Based on these complex interconnections, a model was developed to visualize causal relationships, demonstrating how a mature review culture directly affects key reliability metrics such as rollback frequency and the number of critical incidents that occur after release.

The results of the research have substantial practical value for managers and engineering teams, as they highlight that investing in an organizational culture that supports open and constructive review is a decisive factor in ensuring long-term stability and product quality. This transforms code review from a purely technical procedure into a fundamental

© Абакумов Р. В., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

attribute of successful engineering practice. Accordingly, the proposed model represents a universal tool for assessing and improving team performance by positioning culture as the primary driver of reliability.

Key words: *code review, software quality, development culture, team collaboration, reliability metrics, distributed teams, interdisciplinary approach.*

Постановка проблеми

Із розширенням міжнародних інженерних команд зростає потреба в гарантуванні високої надійності програмного забезпечення. Розподілене робоче середовище, що характеризується різними культурними нормами, комунікаційними стилями та інженерними практиками, створює суттєві перешкоди для підтримки уніфікованої якості коду. Хоча практика code review визнана ключовим механізмом контролю якості, її ефективність у мультикультурних командах часто знижується. Проблема полягає в тому, що code review розглядають переважно як технічний інструмент, ігноруючи його важливу роль як культурного феномену, що базується на колективній відповідальності та взаємній довірі.

На сьогодні недостатньо вивчена кількісна та якісна кореляція між культурою code review та метриками надійності програмного продукту. Необхідно заповнити цю прогалину, застосовуючи аналогії з науковим методом, зокрема з концепціями peer review та відтворюваності, щоб довести, що зріла культура code review є не просто рекомендованою практикою, а критично вагомим чинником, що передбачає надійність, яку можна порівняти з безпекою в інших інженерних дисциплінах. Це дослідження має на меті переосмислити code review як інструмент наукової валідації в рамках програмної інженерії, що дасть змогу розробити ефективніші стратегії для підвищення якості в глобальних командах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У теперішню епоху створенням програмного забезпечення все частіше займаються великі міжнародні команди, що ставить на перше місце питання надійності. Для гарантування високої якості та безпеки програмна інженерія має запозичувати підходи з класичних інженерних дисциплін, де надійність є ключовою. У цьому контексті культура code review виходить за межі суто технічного процесу, стаючи фундаментальним механізмом, що передбачає стабільність. Ця практика багато в чому подібна до наукового рецензування, що підтверджує достовірність наукових знань.

Учені активно продовжують пошуки оптимальних підходів до code review. Так, E. Witter dos Santos та I. Nunes [1] досліджували ефективність code review у розподілених командах, наголошуючи, що, попри технічний характер, ця практика є важливим інструментом для обміну знаннями. Схожу методологію застосували D. I. De Silva, W. A. C. Pabasara, S. V. Sangkavi, L. G. A. T. D. Wijerathne, W. M. K. H. Wijesundara та Reezan [2] під час вивчення впливу рецензування коду на якість програмного забезпечення, з'ясувавши, що це дієвий метод для виявлення багів та покращення читабельності коду.

На окрему увагу заслуговують праці, присвячені викликам у міжнародних командах. M. Hoffmann, D. Mendez, F. Fagerholm та A. Luckhardt [3] зосередилися на людському аспекті командної роботи, а D. Welsch, D. Mötefindt, L. Burk та M. Neumann [4] визначили, як культурні відмінності можуть створювати бар'єри. B. Zaghloul, D. Riehle та M. Zhou [5] окреслили особливості комунікації в глобальних командах із Китаєм, а C. Miller, P. Rodeghero, M-A. Storey, D. Ford та T. Zimmermann [6] аналізували виклики, які виникли під час віддаленої роботи в умовах пандемії. Важливу цінність має дослідження P. Ofem, B. Isong та F. Lugayizi [7] щодо прозорості в інженерії програмного забезпечення, що є ключовим для формування довіри.

Для оцінювання надійності програмного забезпечення активно використовують чіткі метрики. Науковці P. Haindl та R. Plösch [10] наголошують на важливості таких показників, як час відновлення, частота відкатів та кількість критичних інцидентів. Ці метрики дають змогу командам проактивно вимірювати ефективність своїх практик. M. Jureczko, Ł. Kajda та P. Górecki [11] підтвердили, що якість процесу рецензування безпосередньо впливає на кількість дефектів, які потрапляють у реліз.

Наукову цінність має публікація R. Li, M. Soliman, P. Liang та P. Avgeriou [12], присвячена виявленню симптомів архітектурної ерозії на ранній стадії за допомогою code review. Варта уваги робота F. Touré, M. Badri та L. Lamontagne [13] щодо модульного тестування, яке по суті є мікроекспериментом. R. B. Silva та C. Bezerra [14] досліджували вплив шкідливих практик безперервної інтеграції на якість програмного забезпечення.

Цікаві паралелі з науковою відтворюваністю провели M. H. Touati та A. R. Moanassar [15], яківивчали, як обчислювальні контейнери та безперервна інтеграція можуть покращити відтворюваність результатів наукових досліджень.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є систематизація та верифікація емпіричних даних щодо кореляційного взаємозв'язку між інженерною культурою code review та рівнем надійності програмного забезпечення в контексті функціонування великих міжнародних команд.

Викладення основного матеріалу дослідження

У сучасну епоху розробкою програмного забезпечення все частіше займаються великі міжнародні команди, що ставить на перше місце питання надійності. Для гарантування високої якості, безпеки програмного забезпечення та процесів його створеннякомп'ютерна інженерія має запозичувати підходи з класичних інженерних дисциплін, де надійність є ключовою. У цьому контексті культура code review виходить за межі суто технічного процесу, стаючи фундаментальним механізмом, що гарантує стабільність. Ця практика багато в чому подібна до наукового рецензування, що підтверджує достовірність наукових знань.

Modern code review еволюціонував від більш формалізованих практик минулого, як-от інспекція коду, що потребувала офіційних зустрічей, до менш номінальних та гнучкіших процесів. Сьогоднішній підхід часто підтримується спеціалізованими інструментами. Попри технічну природу, він є значно вагомішим, ніж простою перевіркою синтаксису чи виявленням багів. Це визнаний спосіб сприяти обміну знаннями, що приносить користь як авторам, так і рецензентам [1, с. 28]. По суті, code review покращує командну взаємодію, оскільки створює колективну відповідальність за код, перетворюючи його з результату індивідуальної роботи на спільне надбання команди. Зазначене формує спільноту, у якій взаємоповага, довіра та спільні знання стають основою для підвищення загальної якості програмного продукту.

Для повнішого розуміння глибини code review як процесу, його варто розглядати крізь призму академічного рецензування. Подібно до того, як наукова рецензія спрямована на оцінювання методів, які використовує дослідник, code review дає змогу команді охарактеризувати архітектурні рішення та загальну стратегію розробки, перевіряючи її відповідність стандартам. Якщо метою наукової рецензії є розкриття помилок у дослідженні, то code review ефективно виявляє баги та інші потенційні проблеми в програмному коді ще до його інтеграції в основну кодову базу [2, с. 8].

Принцип роботи code review як проактивного бар'єру проти архітектурної ерозії візуалізовано на рисунку 1.

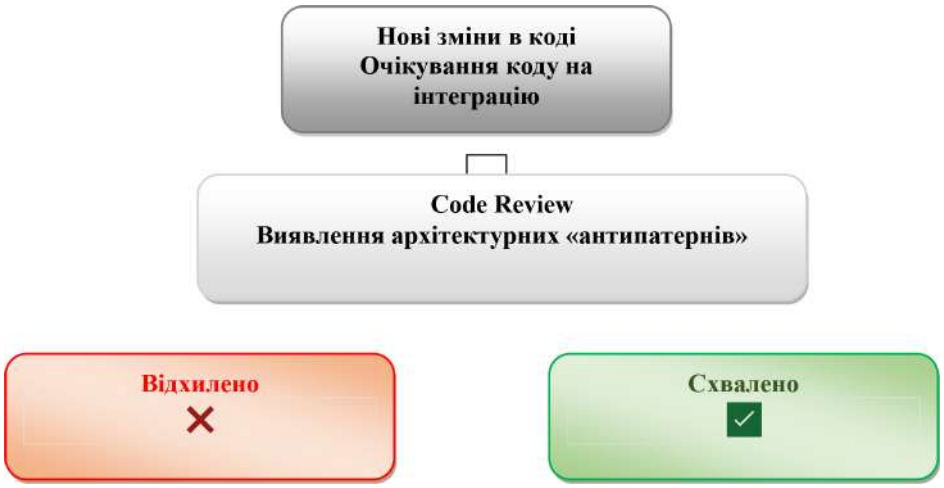


Рис. 1. Бар'єр від архітектурної ерозії

Джерело: сформовано автором

Окреслена схема наочно ілюструє, як code review виступає в ролі критично важливого контрольного пункту в процесі розробки. Вона показує, як цей механізм фільтрує небажані архітектурні рішення та потенційні проблеми, не дозволяючи їм інтегруватися в основну кодову базу. Таким чином, рецензування коду діє як проактивний захист від накопичення технічного боргу та архітектурної ерозії, забезпечуючи довготривалу стабільність і надійність програмного продукту.

Зрештою, це призводить до значного поліпшення якості коду та його надійності. Цей процес не тільки допомагає знаходити дефекти, але й робить код більш зрозумілим та легким для подальшої модифікації, що безпосередньо покращує його загальну якість. Два виміри цього впливу, технічний та культурний, які сукупно визначають надійність програмного забезпечення, візуалізовано на рисунку 2.

Як видно з рис. 2, культура рецензування коду має подвійний вплив на показники надійності. По-перше, вона здійснює прямий технічний вплив завдяки виявленню дефектів та їх усуненню ще до виходу продукту в реліз, що безпосередньо сприяє підвищенню якості коду. По-друге, культура рецензування виконує важливу соціально-культурну функцію, формуючи здорову командну взаємодію, яка ґрунтується на довірі, відкритій комунікації та колективній відповідальності.

Сукупність цих двох аспектів визначає ключові показники надійності, зокрема кількість багів після релізу, частоту відкатів та рівень критичних інцидентів. Отже, модель демонструє, що інвестиції у становлення зрілої



Рис. 2. Подвійний вплив Code Review

Джерело: сформовано автором

культури code review є визначальним чинником для забезпечення довгострокової стабільності та високої якості програмного продукту.

У міжнародних командах, де члени мають різну національність, виникають значні виклики, які позначаються на ефективності комунікації та взаємодії [3, с. 3]. Культурні відмінності впливають на те, як ми думаємо та діємо, і можуть створювати бар'єри для якості роботи команди та кінцевого продукту [4].

Одне з головних ускладнень – це різне розуміння критики та зворотного зв'язку, що може впливати на процес code review [3, с. 12]. Наприклад, в одних культурах прямий і чесний фідбек сприймається як конструктивний, тоді як в інших його розцінюють як особисту образу, що призводить до проблеми «збереження обличчя» (face-saving) та уникнення відкритого обговорення [5, с. 136]. Крім того, у глобальному розподіленому середовищі відсутність неформальних розмов, як-от «розмови біля кулера», може спричинити відчуття роз'єднаності та зниження соціальних зв'язків [6]. Це підкреслює необхідність глибокого осмислення культурних відмінностей у мультикультурних командах [4].

Для вирішення зазначених проблем критично важливим є впровадження спільних метрик та прозорих практик. Прозорість, яку розглядають як розкриття інформації про програмні продукти та процеси, є ключовою для створення довіри та впевненості зацікавлених сторін під час розробки програмного забезпечення [7, с. 33]. Це допомагає не лише підвищити якість, але й сприяє подоланню культурних розбіжностей, щоб кожен член команди мав спільне розуміння цілей та операцій.

Варто акцентувати, що якщо не враховувати культурні виклики в міжнародних командах, вони можуть значно знизити ефективність code review, у такий спосіб підриваючи якість коду. Отже, усвідомлене формування прозорої та відкритої культури рецензування є значно вагомим для подолання окресленого бар'єру. Це переводить нас до наступного визначального поняття – надійності, яка є безпосереднім наслідком зрілих інженерних практик. У цьому сенсі програмна інженерія має запозичувати підходи з класичних дисциплін, як-от авіація чи будівництво, де надійність є синонімом безпеки. Несправність програмного забезпечення, подібно до відмови механізму літака чи руйнування мосту, може мати катастрофічні наслідки, що свідчить про те, що в сучасному світі надійність програмного забезпечення є не просто технічною характеристикою, а фундаментальним атрибутом безпеки. Щоб оцінити надійність програмного забезпечення, що є ключовим атрибутом якості та безпеки, слід використовувати чіткі метрики. Їх відстеження дає змогу ухвалювати обґрунтовані рішення щодо необхідних оперативних коригувань, виправлення помилок та вдосконалення коду в подальших фазах розробки. Найбільш важливі метрики надійності представлено нижче в таблиці 1.

Отже, представлені метрики надають якісні показники для оцінювання надійності програмного забезпечення. Їхнє використання дає змогу командам не просто реагувати на збої, а й проактивно вимірювати ефективність своїх інженерних практик, зокрема code review, таким чином гарантуючи стабільність та високу якість продукту. Адже саме якість процесу рецензування безпосередньо впливає на кількість дефектів, що потрапляють у реліз, а отже, і на частоту відкатів та критичних інцидентів. Дієвий code review, що знаходить функціональні помилки

Таблиця 1

Основні метрики надійності програмного забезпечення

Метрика	Сутність	Значення
Кількість багів після релізу	Кількість дефектів, виявлених кінцевими користувачами або в робочому середовищі після розгортання продукту	Прямий індикатор якості, що відображає ефективність виявлення помилок на ранніх етапах розробки
Mean Time to Recovery (MTTR)	Середній час, необхідний для повного відновлення роботи системи після збою або інциденту	Чим менше значення, тим вища стійкість і надійність системи
Частота відкатів (Rollbacks)	Кількість випадків, коли новий реліз довелося відкотити назад через критичні помилки	Висока частота свідчить про низьку якість тестування та перевірки перед розгортанням
Кількість критичних інцидентів	Загальна кількість серйозних збоїв системи, що мали значний вплив на її роботу за певний період	Фундаментальний показник надійності та стабільності продукту

Джерело: сформовано на основі аналізу [8–10].

ще до інтеграції коду, допомагає мінімізувати подальші ризики, забезпечуючи стабільність та високу якість продукту [11, с. 804].

Ефективність code review не обмежується лише пошуком явних дефектів. Дослідження показують, що він також є цінним інструментом для виявлення ранніх симптомів архітектурної ерозії – поступового погіршення структури програмного забезпечення [12]. Це може значно ускладнити подальшу підтримку та еволюцію системи, спричинивши довготривалі проблеми з надійністю та стабільністю. Тож рецензування коду дає змогу розкрити такі архітектурні «антипатерни» на ранній стадії, перш ніж вони призведуть до серйозних наслідків. Завдяки цьому code review перетворюється на проактивний механізм, який не тільки знаходить помилки, а й підтримує загальну здорову «архітектуру» проєкту, що є запорукою його довгострокового успіху.

Зазначений проактивний підхід переносить нас до ширших емпіричних паралелей між науковим методом та програмною інженерією. Одним із найяскравіших прикладів є модульне тестування (unit testing), що по суті є мікроекспериментом, де кожен тест перевіряє найменшу гіпотезу про поведінку окремого фрагмента коду [13, с. 70]. Це допомагає розробникам системно та науково підтверджувати правильність роботи найменших компонентів, закладаючи міцний фундамент надійності, що є ключовим для подальшого масштабування та розвитку проєкту.

Якщо модульне тестування можна порівняти з мікроекспериментом, то інтеграційне тестування має свою аналогію в системній біології. Системна біологія вивчає, як взаємодіють різні елементи всередині складної біологічної системи, а інтеграційне тестування фокусується на дослідженні взаємодії між окремими модулями програмного забезпечення. Воно дає змогу виявляти помилки, що виникають на стиках компонентів, і гарантувати, що їхня спільна робота відповідає загальним вимогам, забезпечуючи у такий спосіб цілісність та стабільність усієї системи [14].

Також варто наголосити, що code review є не лише механізмом перевірки коду, а й має глибокі паралелі з академічним рецензуванням (peer review), що є основою для верифікації наукових знань. Як і наукова рецензія, що оцінює методи дослідження та виявляє помилки, code review допомагає команді колективно встановлювати недоліки, підвищувати читабельність коду та забезпечувати його відповідність стандартам [2, с. 4]. Така практика сприяє розкриттю та запобіганню дефектів, що є критично важливим для поліпшення якості програмного забезпечення. По суті, code review є колективною перевіркою валідності та надійності коду, перетворюючи його з індивідуальної роботи на спільне надбання, за яке несе відповідальність уся команда.

Продовжуючи емпіричні паралелі, варто зауважити, що безперервну інтеграцію (Continuous integration) можна порівняти з науковою відтворюваністю. Подібно до того, як відтворюваність у науці гарантує, що експеримент, проведений у різних умовах, дасть ідентичні результати, безперервна інтеграція забезпечує стабільність та відтворюваність програмного продукту [15, с. 32]. Завдяки використанню таких інструментів, як обчислювальні контейнери, CI автоматизує процеси компіляції, збірки та виконання тестів, гарантуючи, що код поводитиметься однаково в будь-якому середовищі розробки, тестування чи розгортання. Це є дуже важливим для високої якості продукту та мінімізації помилок на всіх етапах розробки.

Загалом у контексті сучасної програмної інженерії ключові практики розробки можуть бути осмислені через призму фундаментальних принципів наукового методу. Окреслені паралелі візуалізує наступна схема (рис. 3).

Такий підхід не тільки підвищує надійність та якість програмного продукту, але й сприяє формуванню зрілої інженерної культури, яка проактивно запобігає проблемам.

Проведені паралелі свідчать про те, що:

– модульне тестування (Unit testing) є аналогом мікроексперименту, де кожен тест перевіряє найменшу гіпотезу щодо поведінки окремого компонента;

– інтеграційне тестування (Integration testing) можна порівняти з підходом системної біології, що досліджує взаємодію між елементами складної системи;

– рецензування коду (Code review) є формою академічного рецензування (peer review), що забезпечує колективну верифікацію та підвищення достовірності програмного коду;

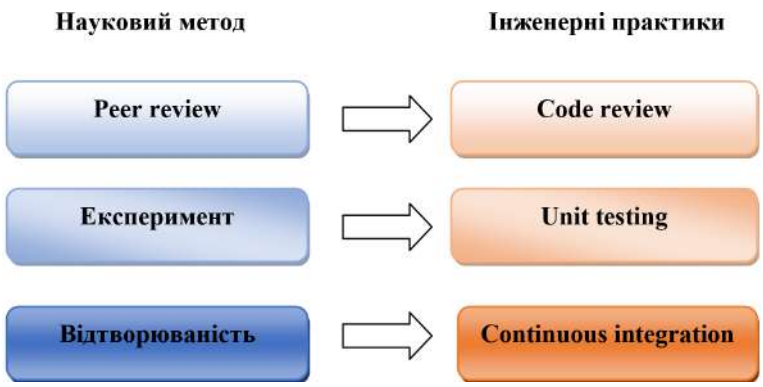


Рис. 3. Методологічні паралелі між науковим методом і практиками розробки програмного забезпечення

Джерело: сформовано автором

– безперервна інтеграція (Continuous integration) є втіленням принципу відтворюваності, що гарантує стабільність результатів незалежно від середовища.

Кожна з окреслених практик є невіддільним компонентом цілісного процесу, який дає змогу командам розробників не просто реагувати на збої, а системно вимірювати та покращувати ефективність своїх інженерних рішень.

Переходячи від окремих інженерних практик до їхньої сукупної дії, стає очевидним, що успішна розробка програмного забезпечення залежить не лише від технічної досконалості, але й від зрілості командної культури. Саме культура, зокрема в контексті рецензування коду (code review), є ключовим важелем, що перетворює індивідуальну роботу на спільне досягнення й безпосередньо впливає на надійність кінцевого продукту. Для візуалізації цих взаємозв'язків ми створили концептуальну модель, яка представлена на рис. 4.

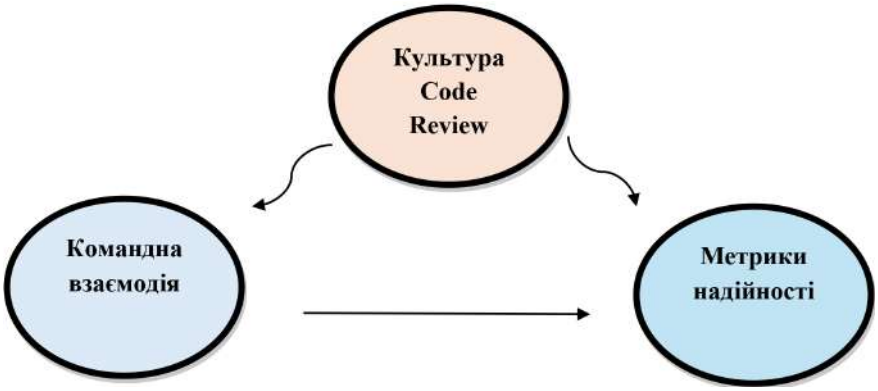


Рис. 4. Взаємозв'язок між інженерними практиками та надійністю програмного забезпечення

Джерело: сформовано автором

Як видно зі схеми, культура рецензування коду має подвійну дію на метрики надійності. По-перше, вона забезпечує прямий технічний вплив через виявлення дефектів та їх усунення ще до потрапляння в реліз. По-друге, має культурне значення, формуючи здорову командну взаємодію, що характеризується довірою, відкритою комунікацією та колективною відповідальністю. Ці два потоки сукупно визначають такі ключові показники надійності, як кількість багів після релізу, частоту відкатів та чисельність критичних інцидентів. Тож модель підкреслює, що інвестиції в становлення зрілої культури code review є дуже вагомими для довгострокової стабільності та якості продукту.

Висновки

Отже, сучасний підхід до розробки програмного забезпечення варто розглядати крізь призму наукового методу. Це дає змогу не просто виправляти помилки, а проактивно створювати дійсно надійні та якісні продукти. У ході роботи виявлено, що основні інженерні практики, такі як модульне та інтеграційне тестування, насправді мають багато спільного з науковими експериментами та дослідженнями.

Особливу увагу приділено рецензуванню коду, оскільки ця практика має подвійний вплив на надійність. З одного боку, це технічний процес, який допомагає зменшити кількість дефектів у коді. З іншого – потужний культурний інструмент, що сприяє обопільній довірі та поліпшує комунікацію в команді.

Щоб краще зрозуміти вказані співвідношення, продемонстровано модель взаємозв'язків між інженерними практиками та надійністю програмного забезпечення. Вона наочно показує, як зріла культура code review

безпосередньо діє на ключові показники надійності, такі як кількість багів після релізу або частоту відкатів. Отже, можна стверджувати, що інвестування у формування зрілої інженерної культури, яка базується на наукових принципах, є критично важливим для довгострокового успіху будь-якого проєкту.

Напрямами подальших досліджень, що випливають з отриманих висновків, є проведення детального кейс-стаді практик рецензування коду у великих міжнародних компаніях, таких як Google, Microsoft чи EPAM, для виявлення найкращих підходів, що забезпечують високу надійність. Також актуальним завданням є розроблення конкретних метрик для кількісного вимірювання «зрілості культури code review», що дасть змогу об'єктивно оцінювати її значення. Нарешті, дослідження впливу мультикультурності на стиль рецензування коду в розподілених командах надасть практичні рекомендації для подолання культурних бар'єрів та покращення комунікації, що є критично важливим для надійності в умовах глобалізації.

Список використаної літератури

1. Witter dos Santos E., Nunes I. Investigating the effectiveness of peer code review in distributed software development based on objective and subjective data. *Journal of Software Engineering Research and Development*. 2018. № 6(14). P. 1–31. DOI: https://doi.org/10.1186/s40411-018-0058-0

2. De Silva D. I., Pabasara W. A. C., Sangkavi S. V., Wijerathne L. G. A. T. D., Wijesundara W. M. K. H., Reezan. The Effectiveness of Code Reviews on Improving Software Quality: An Empirical Study. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2023. № 12(2). P. 1-10. DOI: 10.35940/ijrte.B7666.0712223

3. Hoffmann M., Mendez D., Fagerholm F., Luckhardt A. The human side of Software Engineering Teams: an investigation of contemporary challenges. 2022. P. 1-18. URL: https://arxiv.org/abs/2104.03712

4. Welsch D., Mötefindt D., Burk L., Neumann M. Navigating Cultural Diversity: Barriers and Potentials in Multicultural Agile Software Development Teams. 2023. URL: https://arxiv.org/abs/2311.12061

5. Zaghloul B., Riehle D., Zhou M. Communication in Firm-Internal Global Software Development with China. *Software Business*. Vol. 2. P. 132-138. DOI: 10.1007/978-3-319-19593-3_11

6. Miller C., Rodeghero P., Storey M-A., Ford D., Zimmermann T. "How Was Your Weekend?" Software Development Teams Working From Home During COVID-19. 2021. URL: https://arxiv.org/abs/2101.05877

7. Ofem P., Isong B., Lugayizi F. Metrics for Evaluating and Improving Transparency in Software Engineering: An Empirical Study and Improvement Model. *SN Computer Science*. 2024. № 5(1097). P. 1-35. DOI: 10.1007/s42979-024-03471-3

8. Software.com. Engineering Metrics: Mean Time to Recovery. 2025. URL: https://www.software.com/engineering-metrics/mean-time-to-recovery

9. Forbes Councils. Minimizing The Impact Of Customers Finding Bugs. 2023. URL: https://www.forbes.com/councils/forbestechcouncil/2023/09/18/minimizing-the-impact-of-customers-finding-bugs

10. Haindl P., Plösch R. Value-oriented quality metrics in software development: Practical relevance from a software engineering perspective. *IET Software*. 2022. № 16(2). P. 167–184. DOI: 10.1049/sfw2.12051

11. Jureczko M., Kajda Ł., Górecki P. Code review effectiveness: an empirical study on selected factors influence. *IET Software*. 2021. № 14(7). P. 794-805. DOI: 10.1049/iet-sen.2020.0134

12. Li R., Soliman M., Liang P., Avgeriou P. Symptoms of Architecture Erosion in Code Reviews: A Study of Two OpenStack Projects. 2022. URL: https://arxiv.org/abs/2201.01184v1

13. Touré F., Badri M., Lamontagne L. Investigating the prioritization of unit testing effort using software metrics. In Proceedings of the 12th International Conference on Evaluation of Novel Approaches to Software Engineering (ENASE'17). 2017. P. 69–80. DOI: 10.5220/0006319300690080

14. Silva R. B., Bezerra C. Empirical investigation of the influence of continuous integration bad practices on software quality. *Virtual event*. 2022. URL: https://sol.sbc.org.br/index.php/vem/article/view/22330/22154

15. Touati M. H., Moanassar A. R. Using Computing Containers and Continuous Integration to Improve Numerical Research Reproducibility. *International Journal of Computer*. 2018. № 30(1). P. 27–33. DOI: https://doi.org/10.53896/ijc.v30i1.1249

References

1. Witter dos Santos, E., & Nunes, I. (2018). Investigating the effectiveness of peer code review in distributed software development based on objective and subjective data. *Journal of Software Engineering Research and Development*, 6(14), 1–31. https://doi.org/10.1186/s40411-018-0058-0

2. De Silva, D. I., Pabasara, W. A. C., Sangkavi, S. V., Wijerathne, L. G. A. T. D., Wijesundara, W. M. K. H., & Reezan. (2023). The Effectiveness of Code Reviews on Improving Software Quality: An Empirical Study. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 12(2), 1-10. https://doi.org/10.35940/ijrte.B7666.0712223

3. Hoffmann, M., Mendez, D., Fagerholm, F., & Luckhardt, A. (2022). *The human side of Software Engineering Teams: an investigation of contemporary challenges*. https://arxiv.org/abs/2104.03712

4. Welsch, D., Mötefindt, D., Burk, L., & Neumann, M. (2023). *Navigating Cultural Diversity: Barriers and Potentials in Multicultural Agile Software Development Teams*. https://arxiv.org/abs/2311.12061

5. Zaghloul, B., Riehle, D., & Zhou, M. (2015). Communication in Firm-Internal Global Software Development with China. In *Software Business*, 2, 132-138. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19593-3_11

6. Miller, C., Rodeghero, P., Storey, M-A., Ford, D., & Zimmermann, T. (2021). "*How Was Your Weekend?*" *Software Development Teams Working From Home During COVID-19*. https://arxiv.org/abs/2101.05877

7. Ofem, P., Isong, B., & Lugayizi, F. (2024). Metrics for Evaluating and Improving Transparency in Software Engineering: An Empirical Study and Improvement Model. *SN Computer Science*, 5(1097), 1-35. https://doi.org/10.1007/s42979-024-03471-3

8. Software.com. (2025). *Engineering Metrics: Mean Time to Recovery*. https://www.software.com/engineering-metrics/mean-time-to-recovery

9. Forbes Councils. (2023). *Minimizing The Impact Of Customers Finding Bugs*. https://www.forbes.com/councils/forbestechcouncil/2023/09/18/minimizing-the-impact-of-customers-finding-bugs

10. Haindl, P., & Plösch, R. (2022). Value-oriented quality metrics in software development: Practical relevance from a software engineering perspective. *IET Software*, 16(2), 167–184. https://doi.org/10.1049/sfw2.12051

11. Jureczko, M., Kajda, Ł., & Górecki, P. (2021). Code review effectiveness: an empirical study on selected factors influence. *IET Software*, 14(7), 794-805. https://doi.org/10.1049/iet-sen.2020.0134

12. Li, R., Soliman, M., Liang, P., & Avgeriou, P. (2022). *Symptoms of Architecture Erosion in Code Reviews: A Study of Two OpenStack Projects*. https://arxiv.org/abs/2201.01184v1

13. Touré, F., Badri, M., & Lamontagne, L. (2017). Investigating the prioritization of unit testing effort using software metrics. In *Proceedings of the 12th International Conference on Evaluation of Novel Approaches to Software Engineering (ENASE'17)*, 69–80. https://doi.org/10.5220/0006319300690080

14. Silva, R. B., & Bezerra, C. (2022). Empirical investigation of the influence of continuous integration bad practices on software quality. In *Virtual event*. SBC. https://sol.sbc.org.br/index.php/vem/article/view/22330/22154

15. Touati, M. H., & Moanassar, A. R. (2018). Using Computing Containers and Continuous Integration to Improve Numerical Research Reproducibility. *International Journal of Computer*, 30(1), 27–33. https://doi.org/10.53896/ijc.v30i1.1249

Дата першого надходження рукопису до видання: 20.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 620.9:621.039.566:620.97 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.2

Є. Б. АЛФІМОВ
магістр, консалтинг у сфері енергетики, дослідник, Ноксвіль, США
ORCID: 0009-0003-2832-041X

ІНТЕГРАЦІЯ МАЛИХ МОДУЛЬНИХ РЕАКТОРІВ У ДИНАМІЧНІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ З ВИСОКОЮ ЧАСТКОЮ ВДЕ ТА МЕТОДИ КЕРУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯМ

Актуальність дослідження зумовлено необхідністю підвищення надійності та гнучкості енергосистем із високою часткою відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема вітрових електростанцій (ВЕС), робота яких характеризується високою варіативністю та похибками прогнозування. Нестабільність виробітку ВДЕ створює потребу в додаткових балансуючих потужностях і резервних технологіях, що підвищує вартість електроенергії та ускладнює досягнення цілей низьковуглецевого розвитку. У цих умовах особливого значення набуває дослідження ролі малих модульних реакторів (ММР) як джерела, здатного поєднувати базову генерацію та гнучке оперативне регулювання.

Метою статті є формування науково-практичних засад інтеграції малих модульних реакторів у динамічні енергосистеми з високою часткою відновлюваних джерел енергії, зокрема вітрових електростанцій, з огляду на особливості прогнозування виробітку та керування навантаженнями.

Методологія дослідження ґрунтується на системному аналізі технічних характеристик сучасних ММР, порівнянні їх маневрових можливостей із традиційними енергоблоками, використанні прогнозних моделей (day-ahead, intraday, nowcasting) та методів сценарного планування. Використано узагальнення досвіду міжнародних енергетичних організацій, аналітику національних лабораторій, а також результати моделювання гібридних енергосистем із синхронізацією ММР та ВДЕ.

Результати дослідження показали, що ММР здатні компенсувати короткострокові коливання виробітку ВЕС завдяки регулюванню потужності з градієнтом 2–5 % від номінальної на хвилину, зменшувати потребу у швидкодійних газотурбінних чи акумулюючих резервах, а також підвищувати коефіцієнт використання встановленої потужності енергосистеми на 10–15 %. Виявлено, що поєднання ММР із цифровими системами прогнозування та диспетчеризації забезпечує ефективну синхронізацію виробітку з добовими графіками попиту та скорочує потребу в аварійних резервах на 12–18 %.

Висновки засвідчують, що ММР здатні забезпечити надійну роботу енергосистем із високою часткою ВДЕ, зменшити дисбаланс, скоротити обсяги «скидів» відновлюваної генерації та знизити системні витрати. Виявлено проблеми, пов'язані з фізичними обмеженнями маневрових режимів, похибками прогнозування, браком уніфікованих стандартів та відсутністю економічних стимулів для гнучкої експлуатації.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з оптимізацією паливного циклу ММР в умовах регулярних маневрів, розробленням ринкових механізмів винагороди за гнучкість, створенням єдиних стандартів експлуатації та моделюванням сценаріїв інтеграції ММР із ВДЕ в різних пропорціях для визначення їх ролі в майбутніх низьковуглецевих енергосистемах.

Ключові слова: *прогнозування генерації, балансування енергосистем, маневрові режими, цифрові двійники, енергетична гнучкість.*

I. B. ALFIMOV
Master's Degree, Consulting in the Field of Energy, Researcher, Knoxville, USA
ORCID: 0009-0003-2832-041X

INTEGRATION OF SMALL MODULAR REACTOR INTO DYNAMIC POWER DISTRIBUTION SYSTEMS WHICH INCORPORATES MULTIPLE RENEWABLE ENERGY GENERATION SOURCES AND LOAD MANAGEMENT METHODS

The relevance of this study is driven by the need to enhance the reliability and flexibility of power systems with a high share of renewable energy sources (RES), particularly wind power plants (WPP), whose operation is characterized by high variability and forecasting errors. The instability of RES output creates demand for additional balancing capacity and reserve technologies, which increases the cost of electricity and complicates the achievement of low-carbon development goals. Under these conditions, the role of small modular reactors (SMRs) becomes especially important as a source capable of combining baseload generation with flexible operational regulation.

The purpose of the article is to develop scientific and practical principles for integrating small modular reactors into dynamic power systems with a high share of renewable energy sources, particularly wind power plants, while accounting for the specific features of generation forecasting and load management.

© Алфімов Є. Б., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

The research methodology is based on a systematic analysis of the technical characteristics of modern SMRs, comparison of their load-following capabilities with conventional power units, application of forecasting models (day-ahead, intraday, nowcasting), and the use of scenario planning methods. The study draws upon the generalization of international energy organization experience, analyses of national laboratory reports, and results of modeling hybrid power systems synchronized with SMRs and RES.

The findings show that SMRs can compensate for short-term fluctuations in WPP output by regulating power with a gradient of 2–5 % of nominal capacity per minute, reduce the need for fast-response gas turbines or storage reserves, and increase the capacity utilization factor of the system by 10–15 %. The combination of SMRs with digital forecasting and dispatch systems ensures effective synchronization of generation with daily demand profiles and reduces the need for emergency reserves by 12–18 %.

The conclusions demonstrate that SMRs can ensure the reliable operation of power systems with a high share of RES, reduce imbalances, decrease renewable generation curtailment, and lower system costs. However, challenges were identified, including the physical limitations of load-following modes, forecasting errors, lack of unified standards, and absence of economic incentives for flexible operation.

Future research should focus on optimizing the SMR fuel cycle under regular load-following conditions, developing market mechanisms for flexibility rewards, creating unified operating standards, and modeling integration scenarios of SMRs with RES in varying proportions to determine their role in future low-carbon power systems.

Key words: *generation forecasting, power system balancing, load-following operation, digital twins, energy flexibility.*

Постановка проблеми

Інтеграція малих модульних реакторів (ММР) у сучасні енергосистеми постає як складна багаторівнева проблема, тісно пов'язана з пошуком нових рішень для забезпечення надійності та гнучкості електропостачання в умовах зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Висока варіативність виробітку вітрових електростанцій (ВЕС) унаслідок погодних коливань створює додаткові виклики для стабільності енергетичного балансу, що зумовлює потребу у впровадженні прогнозно-аналітичних моделей синхронізації графіків генерації та споживання. Використання аналітики метеорологічних даних у поєднанні з моделюванням добових графіків споживання дозволяє оптимізувати взаємодію ММР із відновлюваними джерелами, формуючи адаптивні стратегії балансування. Особливої уваги потребує швидкість і точність регулювання потужності, адже здатність ММР до гнучкого маневрування визначає їх ефективність у покритті пікових навантажень і компенсації нерівномірного надходження енергії з вітрових установок. Таким чином, проблема інтеграції ММР виходить за межі суто технічного завдання і безпосередньо пов'язана з важливими науковими пошуками у сфері прогнозування, управління навантаженнями та створення інтелектуальних енергосистем, а також з практичними потребами підвищення надійності та енергетичної безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наукові дослідження підтверджують, що інтеграція ММР у динамічні енергосистеми з високою часткою відновлюваних джерел енергії є одним із ключових напрямів розвитку сучасної енергетики. Основні підходи охоплюють алгоритмічне управління, моделювання гібридних архітектур, матеріалознавчі аспекти безпеки та політико-економічні чинники впровадження.

У першому напрямі наукових праць увагу зосереджено на цифрових і логістичних методах, здатних підсилити функціональність енергосистем. Зокрема, О. Коростін (O. Korostin) [1] досліджує застосування технологій оброблення природної мови для вилучення даних у морській логістиці, що може бути використано для прогнозування навантажень і режимів роботи енергосистем. Той самий дослідник [2] аналізує можливості оптимізації транспортних маршрутів із застосуванням штучного інтелекту, наголошуючи на синхронізації енергетичних і транспортних потоків. М. Павловський (M. Pavlovskyi) [3] пропонує рішення щодо підвищення ефективності двигунів за допомогою біопалива, що демонструє потенціал у поєднанні з ММР для декарбонізації транспортно-енергетичного комплексу. Подальші дослідження мають бути присвячені створенню інтегрованих цифрових платформ, що синхронізуватимуть енергетичні та логістичні системи.

Другий напрям досліджень охоплює політико-правові аспекти. П. Хмеляж (P. Chmielarz) [4] аналізує медіацію в соціально-економічних процесах як інструмент урегулювання складних системних відносин, що релевантно для формування рамок упровадження ММР. У подальшій роботі цей дослідник [5] розглядає енергетичну безпеку Польщі через призму газових постачань і політичних рішень, демонструючи важливість диверсифікації джерел енергії. Ці праці окреслюють перспективи створення нормативних і правових механізмів, необхідних для ефективної інтеграції ММР у національні енергетичні стратегії.

Третій науковий напрям включає технічні характеристики та надійність. Б. Маринушкін [6] описує ключові конструктивні особливості ММР, підкреслюючи їх компактність і масштабованість. І. Г. Шараєвський, Т. С. Власенко, Л. Б. Зімін та співавтори [7] досліджують металофізичні проблеми зварних з'єднань корпусів реакторів, акцентуючи на довгостроковій надійності, що є критично важливим для експлуатації ММР. Подальші дослідження мають спрямовуватися на створення моделей прогнозування деградації матеріалів у маневрових режимах.

Четвертий напрям стосується інтеграційних моделей та керування навантаженнями. Д. Міхельсон (D. Michaelson) та Дж. Цзян (J. Jiang) [8] здійснюють огляд інтеграції ММР у мікромережі на основі ВДЕ, акцентуючи на потребі ефективного енергоменеджменту. Також Д. Міхельсон (D. Michaelson) і Дж. Цзян (J. Jiang) [9] аналізують перспективи балансування навантажень у IEEE Power and Energy Magazine. Г. А. Габар (H. A. Gabbar) та О. Л. А. Естевес (O. L. A. Esteves) [10] демонструють симуляцію в режимі «reactor-in-the-loop», що дозволяє оцінювати динаміку гібридних систем у реальному часі. Г. А. Абушама (H. A. S. Abushamah), О. Буріан (O. Burian), Д. Рей (D. Ray) та Р. Шкода (R. Škoda) [11] пропонують інтеграцію систем централізованого теплопостачання з ММР та циклами Ренкіна із застосуванням акумуляторів енергії. Ефективність використання ММР у поєднанні з тепловими мережами для комбінованого виробництва електроенергії та тепла доводять Б. Пудел (B. Poudel) і Р. Гокараджу (R. Gokaraju) [12]. Р. С. Ель-Емам (R. S. El-Emam) і М. Г. Субкі (M. H. Subki) [13] досліджують перспективи і перешкоди створення ядерно-відновлюваних синергій.

Своєю чергою К. К. Сімоглу (C. K. Simoglou), І. М. Кайсас (I. M. Kaissas) та П. Н. Біскас (P. N. Biskas) [14] оцінюють наслідки інтеграції ММР у сучасні мережі, звертаючи увагу на складність балансування та стабільність. Подальші дослідження в цьому напрямі доцільно зорієнтувати на багаторівневе управління із застосуванням алгоритмів машинного навчання.

Узагальнення показує, що ММР можуть відіграти ключову роль у формуванні гнучких енергосистем із високою часткою відновлюваних джерел. Вони забезпечують балансування та надійність у динамічних умовах і створюють основу для розвитку інтегрованих енергетично-логістичних інфраструктур. Подальші наукові пошуки мають зосередитися на вдосконаленні алгоритмів керування, довгостроковому аналізі матеріалів і створенні симуляційних платформ реального часу.

Попри значні досягнення у вивченні можливостей ММР, залишається нерозв'язаною низка проблем. Не досить досліджено умови їх інтеграції в сучасні енергосистеми з огляду на технічні обмеження та специфіку інфраструктури. Невизначеність прогнозів відновлюваної генерації, особливо вітрової, обмежує точність балансування та ускладнює синхронізацію з добовими графіками споживання. Бракує глибоких досліджень маневрових можливостей ММР у режимах швидкої компенсації коливань ВДЕ, тоді як нормативна база і стандарти гнучкої експлуатації залишаються фрагментарними. Крім того, маловивченими є аспекти інтеграції інтелектуальних систем керування навантаженнями, що могли б суттєво знизити системні ризики.

Запропоноване дослідження спрямоване на заповнення цих прогалин шляхом аналізу технічних і організаційних умов використання ММР, вивчення їх взаємодії з вітровими електростанціями на основі прогнозних моделей та сценарного планування, а також оцінювання ефективності маневрових режимів у компенсації нестабільності. Особливу увагу приділено виявленню ключових проблем інтеграції та формуванню практичних рекомендацій щодо розвитку інтелектуальних методів керування, що дозволить не лише підвищити гнучкість енергосистем, але й створити основу для нових теоретико-методологічних підходів у цій сфері.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є обґрунтування науково-практичних підходів до інтеграції малих модульних реакторів у динамічні енергосистеми з високою часткою ВДЕ, зокрема вітрових електростанцій, з огляду на специфіку прогнозування виробітку та регулювання навантажень.

Для досягнення поставленої мети передбачається розв'язання таких **завдань:**

1) дослідити умови і технологічні аспекти інтеграції малих модульних реакторів у гнучкі енергосистеми з урахуванням технічних обмежень і прогнозної невизначеності;

2) визначити особливості взаємодії ММР із вітровими електростанціями та проаналізувати можливості оперативного регулювання потужності для компенсації нестабільності генерації;

3) сформулювати практичні рекомендації щодо підвищення ефективності синхронізації ММР з відновлюваними джерелами енергії та розвитку інтелектуального керування навантаженнями.

Викладення основного матеріалу дослідження

Використання ММР у сучасних системах електропостачання набуває особливого значення в умовах зростання частки ВДЕ та необхідності підтримання стабільності енергобалансу. Їх інтеграція вимагає врахування комплексу умов та технологічних аспектів, що визначають ефективність і надійність роботи енергосистеми. До ключових факторів належать технічна готовність інфраструктури, можливості швидкого регулювання потужності, взаємодія з прогнозними моделями вітрової генерації та адаптація до змін добового навантаження. Ці параметри визначають практичний потенціал ММР як гнучкого джерела базового та маневреного виробітку електроенергії (табл. 1).

Сучасні технічні доповіді МАГАТЕ свідчать, що ММР здатні здійснювати регулювання потужності з градієнтом 2–5 % від номінальної на хвилину в діапазоні приблизно від 20 % до 100 % встановленої потужності без порушення паливного циклу, що робить їх порівнянними або навіть кращими за газотурбінні установки у функції «load following» [15]. Це дозволяє покривати коливання, спричинені високою часткою ВДЕ, зокрема вітрових електростанцій, де прогнозована амплітуда коливань може досягати 40 % установленої потужності впродовж кількох годин.

Таблиця 1

Основні умови та технологічні аспекти інтеграції малих модульних реакторів у сучасні енергосистеми

Умова/аспект	Сутність	Практичне значення	Приклад застосування
Інфраструктурна готовність	Наявність мереж і підключень до системи	Забезпечення надійної інтеграції без додаткових великих витрат	Використання наявних мережевих вузлів у регіонах із дефіцитом потужності
Регулювання потужності	Швидке маневрування в діапазоні від базового до пікового навантаження	Балансування енергосистеми в режимі реального часу	Компенсація провалів генерації від ВЕС за різких змін погоди
Прогнозування генерації	Використання метеоаналітики та графіків споживання	Зменшення дисбалансу в системі	Синхронізація виробітку ММР із прогнозом роботи ВЕС
Технологічна безпека	Стійкість до аварійних режимів і надійність реакторних систем	Збереження стабільності мережі та енергобезпеки	Локалізована автономна робота в разі відмови ВДЕ
Гнучкість інтеграції	Масштабованість і модульність установок	Адаптація до потреб конкретних регіонів	Встановлення ММР у віддалених промислових зонах чи на островах

Джерело: сформовано автором на підставі [6, с. 278–280; 7, с. 5–10; 8; 13; 14]

За даними NREL, моделювання гібридних енергосистем показало, що включення ММР до складу відновлюваних комплексів знижує потребу у великих системах акумулювання енергії на 20–35 %, а коефіцієнт використання встановленої потужності енергосистеми підвищується на 10–15 % [16]. У доповідях OECD NEA зазначено, що гнучка ядерна генерація може надати до 200 ГВт регульованої потужності в глобальному масштабі до 2050 року, що суттєво впливає на забезпечення надійності та стійкості низьковуглецевих систем [17].

Таким чином, аспекти, відображені в таблиці 1, виходять за межі суто технічних характеристик і набувають стратегічного значення: швидке регулювання потужності забезпечує маневровість у реальному часі, прогнозна інтеграція дозволяє синхронізувати генерацію ММР із варіативною генерацією ВЕС, а гнучкість масштабування створює передумови для розширення їх ролі у формуванні стійких гібридних енергосистем. В умовах переходу до декарбонізованої економіки це дає змогу не лише підвищити надійність електропостачання, а й оптимізувати витрати на балансування та резерви потужності.

Сучасна інтеграція ММР із вітровими електростанціями ґрунтується на поєднанні стабільної ядерної генерації з високоволатильною потужністю від ВДЕ, що значною мірою залежить від погодних умов. Така взаємодія вимагає розроблення гнучких механізмів прогнозування та балансування, де ключову роль відіграє використання метеоаналітики для коротко- та середньострокового прогнозування виробітку ВЕС у поєднанні з аналізом добових графіків навантаження. ММР у цьому контексті виконують функцію адаптивного резерву, що забезпечує компенсацію дефіциту в разі падіння генерації ВЕС або, навпаки, зменшує власний виробіток у періоди пікового вітрового навантаження, зберігаючи стабільність мережі.

Визначення особливостей взаємодії ММР із вітровими електростанціями (ВЕС) ґрунтується на необхідності поєднання стабільної ядерної генерації та варіативної відновлюваної потужності. Найбільший виклик пов'язаний з високою залежністю виробітку ВЕС від погодних умов і потребою його синхронізації з добовими графіками споживання. У таких умовах важливу роль відіграє якість прогнозування, сценарне планування та здатність ММР до швидкого маневрування, що дозволяє мінімізувати дисбаланс та підвищити ефективність використання ВДЕ (табл. 2).

Таблиця 2

Механізми взаємодії малих модульних реакторів і вітрових електростанцій у контексті прогнозування генерації

Механізм	Характеристика	Кількісні параметри
Короткострокове прогнозування	Використання nowcasting-моделей з горизонтом 1–6 годин	Оновлення прогнозу кожні 5–15 хв
Добове балансування	Узгодження day-ahead прогнозів ВЕС і добових профілів попиту	Горизонт 6–36 годин; оновлення intra-day
Маневрування потужністю ММР	Швидке регулювання в діапазоні штатних градієнтів	2–5 % від номіналу за хвилину в межах 20–100 % потужності (залежно від проєкту)
Сценарне планування	Формування базового, оптимістичного і песимістичного сценаріїв	3–5 сценаріїв для кожного горизонту
Використання надлишкової енергії	Відведення профіциту в тепло- чи водневі процеси	Потужність відводу залежить від «вікон» ВЕС

Джерело: сформовано автором на підставі [9, с. 59–61; 10; 11; 18; 21]

Практичні результати підтверджують значення цих механізмів. За даними IEA Wind Task 36, впровадження ансамблевих підходів до прогнозування дозволяє істотно знизити похибку короткострокових прогнозів і забезпечити більш плавне балансування [18]. Аналітика NREL показує, що в гібридних енергосистемах за участю ММР знижується потреба в масштабних акумулюючих потужностях, а реактори можуть компенсувати падіння виробітку ВЕС протягом кількох хвилин [19]. Дослідження Європейської комісії (JRC) підтверджують, що інтеграція

добових прогнозів попиту та генерації ВЕС в єдині моделі балансування дозволяє підвищити стійкість системи навіть за 15 % похибки прогнозу [20]. Згідно з оновленими даними NREL щодо інтегрованих прогнозів сонячної, вітрової генерації та навантаження, використання надлишкової енергії ВЕС для водневої чи теплової генерації підвищує загальний коефіцієнт використання системи [21]. Окремі дослідження прогнозних похибок показують, що сценарне планування з кількома варіантами розвитку подій дає змогу скоротити використання аварійних резервів на 12–18 % [22]. Таким чином, взаємодія ММР і ВЕС перетворюється на системний інструмент гнучкої інтеграції ВДЕ в низьковуглецеві енергосистеми.

Оперативне регулювання потужності ММР нині розглядається не як допоміжна, а як інтегральна функція їх роботи в енергосистемах із високою часткою ВДЕ. Саме здатність до «load-following» і гнучких режимів маневрування визначає практичну цінність ММР як балансуючого ресурсу, який поєднує стабільність базового навантаження з гнучкістю швидкодійних резервів. Наукові дослідження і демонстраційні проєкти показують, що завдяки поєднанню реакторних, турбінних та системних інструментів такі установки можуть забезпечувати компенсацію нестабільності відновлюваної генерації, зменшувати потребу в газотурбінних чи акумулюючих резервах та стабілізувати мережу без втрати ефективності паливного циклу (табл. 3).

Таблиця 3

Основні режими та інструменти оперативного регулювання потужності ММР

Режим/інструмент	Характеристика	Системна функція
Добове «load-following»	Зміна потужності в широкому діапазоні відповідно до добового профілю	Покриття пікових навантажень
Ступінчасте мультимодульне керування	Чергова робота модулів із можливістю гарячого резерву	Швидке реагування на зміни ВДЕ
Турбінний байпас	Швидке скидання пари без негайної зміни реакторної потужності	Амортизація короткочасних коливань
Нетто-маневрування через відвід енергії	Перерозподіл між мережею і споживачами тепла/водню	Оптимізація профіциту/дефіциту
Участь в AGC (Automatic Generation Control)	Автоматична корекція потужності в межах проєктних обмежень	Первинне і вторинне регулювання частоти

Джерело: сформовано автором на підставі [15; 17; 19; 23; 27; 28]

Практичні випробування та досвід експлуатації підтверджують реалістичність цих режимів. У Франції експлуатація парку PWR демонструє добові цикли зниження потужності від 100 % до 20 % і повернення до номіналу двічі на добу менш ніж за 30 хвилин, із темпом маневрування 30–40 МВт/хв (~3 % Pn/хв), що дозволяє покривати піки навантаження і балансувати варіативну генерацію [23]. У випадку проєкту GEH BWRX-300 технічні характеристики передбачають маневрування в діапазоні 50–100 % потужності, з можливістю підвищення від 50 % до 100 % приблизно за 2 години, а також миттєве зниження віддачі за допомогою турбінного байпасу для демпфування коливань вітрової чи сонячної генерації [24].

Для мультимодульних систем, як-от NuScale VOYGR, застосовується ступінчасте керування: частина модулів працює в базовому режимі, тоді як інші утримуються в гарячому резерві. Це дозволяє реалізувати добові цикли «100 → 20 → 100 %» із темпами до ≈40 % Pn/год та виконувати швидкі кроки зміни на рівні 20 % від номінальної потужності за ≈10 хвилин, що еквівалентно компенсації дефіциту масштабу сотень мегават у межах години [25]. Додатковий інструмент – інтеграція з водневими і тепловими установками – забезпечує «нетто-маневрування»: надлишки електроенергії відводяться у водневий електроліз або теплові процеси, тоді як у разі дефіциту ММР спрямовують енергію назад у мережу. Демонстраційні розрахунки NuScale показують, що такий режим дозволяє стабілізувати профіль навантаження без перевантаження активної зони та зменшити циклічне навантаження на паливо [26].

Сучасні автоматизовані системи управління передбачають участь ММР в AGC (Automatic Generation Control), коли реактор автоматично реагує на зміни частоти мережі через невеликі коливання потужності в рамках проєктних обмежень. Це знижує потребу у швидкодійних газотурбінних резервах і дозволяє інтегрувати більші обсяги ВДЕ, не знижуючи надійність енергопостачання [27; 28]. У сукупності наведені приклади підтверджують, що сучасні ММР здатні виконувати роль не лише базового джерела, але й гнучкого балансуючого інструмента, що має стратегічне значення для побудови стійких низьковуглецевих енергосистем.

Підвищення ефективності синхронізації ММР із ВДЕ визначається комплексом проблем, які виходять за межі суто технічної сфери. Найбільш суттєвим є розрив між динамікою роботи ММР та швидкоплинними коливаннями генерації від сонячних і вітрових електростанцій. Незважаючи на здатність до режимів «load-following», маневрування реакторів обмежене теплогідравлічними та нейтронно-фізичними параметрами [6, с. 278–280; 7, с. 5–10; 8, с. 111638], що ускладнює компенсацію помилок прогнозування відновлюваної генерації, які в середньому сягають 10–15 % [8, с. 111638; 9, с. 59–61]. У таких умовах надмірне навантаження на маневрові цикли може призвести до прискореного зносу обладнання та зростання експлуатаційних витрат.

Іншою проблемою є недосконаліть цифрової інфраструктури. Сучасні SCADA-системи не забезпечують достатньої інтеграції з прогнозними моделями, а використання методів машинного навчання для кореляції виробітку ММР

і ВДЕ ще перебуває на стадії апробації [10]. Відсутність адаптивних алгоритмів ускладнює синхронізацію добових і внутрішньодобових графіків, знижуючи ефективність балансування [11]. Ситуацію посилює нестача уніфікованих стандартів гнучкої експлуатації: більшість нормативів орієнтована на базову роботу реакторів і не встановлює допустимі параметри частоти й амплітуди маневрування [13]. Це створює правову та технічну невизначеність для операторів.

Суттєвим викликом є також відсутність економічних стимулів. Оператори систем передачі часто не компенсують витрати на додаткові режими навантаження, що стримує готовність власників ММР брати участь у балансуванні [13]. Паралельно недостатньо розвинені системи керування попитом: на практиці вони зводяться до локального згладжування піків, хоча для інтеграції ММР необхідні комплексні рішення із залученням технологій «розумних мереж», цифрових двійників та прогнозної аналітики.

Підвищення ефективності синхронізації ММР із ВДЕ потребує поєднання прогнозних, технічних та регуляторних рішень. Найважливішим завданням є адаптація прогнозування: ансамблеві моделі погоди та добові профілі попиту мають інтегруватися в багатогоризонтне планування роботи ММР з регулярним оновленням упродовж доби. Використання модельно-предиктивного керування з обмеженнями за градієнтами потужності та теплогідравлічними параметрами дозволяє знизити ризики надмірного циклювання і водночас забезпечити відповідність режимів реактора динаміці відновлюваної генерації.

З технічного боку пріоритетом є розподіл маневрових функцій між реакторним і турбінним контурами. Ступінчасте мультимодульне керування дозволяє швидко підхоплювати навантаження за допомогою гарячого резерву, тоді як турбінний байпас і відводи пари забезпечують демпфування коливань без різкої зміни нейтронної потужності. Додатковий ресурс гнучкості створює інтеграція керованих споживачів – електролізерів, теплових накопичувачів, опріснювальних установок, які здатні поглинати профіцит ВДЕ та звільняти електричну потужність у години дефіциту.

Цифрові інструменти мають розширюватися від традиційної SCADA до платформ з елементами штучного інтелекту й цифрових двійників, що дозволяють синхронізувати дані прогнозів, телеметрії та стану обладнання. Це відкриває шлях до адаптивного визначення «операційних конвертів» потужності та обґрунтованого включення ММР у сервіси регулювання частоти й напруги.

Нарешті, регуляторне середовище має створити стимули до гнучкої експлуатації. Тарифи й ринкові правила повинні враховувати додаткові витрати на маневрування та визнавати цінність «нетто-маневрування» через секторну інтеграцію. Стандартизація допустимих режимів load-following і участі ММР в автоматичному регулюванні стане основою для їх системного залучення в балансуючі процеси. Лише комплексна інтеграція прогнозних моделей, модульно-турбінних режимів, інтелектуальних систем керування та економічних стимулів дозволить повною мірою використати потенціал ММР у гнучких низьковуглецевих енергосистемах.

Висновки

У дослідженні встановлено, що ММР здатні поєднувати функції стабільної базової генерації та гнучкого балансування, компенсуючи нестабільність ВДЕ і покриваючи пікові навантаження. Їх можливість змінювати потужність у межах 2–5 % від номінальної за хвилину дозволяє зменшити залежність від швидкодійних резервів і систем акумулювання, водночас підвищуючи ефективність використання встановленої потужності енергосистеми.

Разом із тим окреслено низку ключових проблем, а саме: фізичні обмеження маневрування, значні похибки прогнозування відновлюваної генерації, що сягають 10–15 %, недостатня інтегрованість цифрових платформ для прогнозу і диспетчеризації, відсутність уніфікованих стандартів гнучкої експлуатації та слабкі економічні стимули для участі ММР у балансуванні.

Практичні рекомендації передбачають упровадження сценарних моделей прогнозування, використання цифрових двійників і систем штучного інтелекту для адаптивного керування, а також розроблення регламентованих режимів load-following у мережевих кодах. Перспективним напрямом є інтеграція ММР із водневими та тепловими технологіями, що дозволяє поглинати надлишки ВДЕ та зменшувати навантаження на реактор. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію паливного циклу під час регулярних маневрів, створення ринкових механізмів винагороди за надану гнучкість і моделювання сценаріїв спільної роботи ММР і ВДЕ у різних пропорціях.

Список використаної літератури

1. Korostin O. Application of NLP technologies for data extraction from text messages in maritime logistics. *The Scientific Heritage*. 2024. № 141. P. 42–45. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.12908100

2. Korostin O. Optimization of maritime transportation routes using artificial intelligence: analysis of opportunities and challenges. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*. 2024. № 56. P. 31–38. DOI: https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-03

3. Pavlovskyi M. The improvement of fuel efficiency and environmental characteristics of diesel engine by using biodiesel fuels. In: Boichenko S., Zaporozhets A., Yakovlieva A., Shkilniuk I. (eds.) *Modern technologies in energy and transport*. (*Studies in Systems, Decision and Control*; Vol. 510). Cham: Springer, 2024. P. 37–47. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_4

4. Chmielarz P. Problematyka mediacji w sprawach społecznych i gospodarczych. *Studia Politologica*. 2022. Vol. 370, № 28. P. 45–60. URL: https://www.ceeol.com/search/article-detail?id=1227519 (date of access: 08.03.2025).

5. Chmielarz P. Analiza bezpieczeństwa energetycznego Rzeczypospolitej Polskiej w zakresie dostaw gazu ziemnego w latach 2015–2021 w powiązaniu z działaniami politycznymi oraz prawnymi. *Rocznik Integracji Europejskiej*. 2023. № 17. P. 197–206. DOI: https://doi.org/10.14746/rie.2023.17.12

6. Маринушкін Б. Особливості малих модульних реакторів (ММР). *Universum*. 2024. № 9. С. 276–282. URL: https://archive.liga.science/index.php/universum/article/download/1115/1127 (дата звернення: 08.03.2025).

7. Шараєвський І. Г., Власенко Т. С., Зімін Л. Б., Носовський А. В., Фіалко Н. М., Шараєвський Г. І. Металофізичні проблеми надійності зварювальних з'єднань корпусів реакторів ВВЕР. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2022. № 3. С. 3–15. DOI: https://doi.org/10.31717/2311-8253.22.3.1

8. Michaelson D., Jiang J. Review of integration of small modular reactors in renewable energy microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 152. Article 111638. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111638

9. Michaelson D., Jiang J. Integration of small modular reactors into renewable energy-based standalone microgrids: an energy management perspective. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2022. Vol. 20, № 2. P. 57–63. DOI: https://doi.org/10.1109/MPE.2021.3134149

10. Gabbar H. A., Esteves O. L. A. Real-time simulation of a small modular reactor in-the-loop within nuclear-renewable hybrid energy systems. *Energies*. 2022. Vol. 15, № 18. Article 6588. DOI: https://doi.org/10.3390/en15186588

11. Abushamah H. A. S., Burian O., Ray D., Škoda R. Integration of district heating systems with small modular reactors and organic Rankine cycle including energy storage: design and energy management optimization. *Energy Conversion and Management*. 2024. Vol. 322. Article 119138. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119138

12. Poudel B., Gokaraju R. Small modular reactor (SMR) based hybrid energy system for electricity & district heating. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2021. Vol. 36, № 4. P. 2794–2802. DOI: https://doi.org/10.1109/TEC.2021.3079400

13. El-Emam R. S., Subki M. H. Small modular reactors for nuclear-renewable synergies: prospects and impediments. *International Journal of Energy Research*. 2021. Vol. 45, № 11. P. 16995–17004. DOI: https://doi.org/10.1002/er.6838

14. Simoglou C. K., Kaissas I. M., Biskas P. N. Assessing the implications of integrating small modular reactors in modern power systems. *Energies*. 2025. Vol. 18, № 10. Article 2578. DOI: https://doi.org/10.3390/en18102578

15. Non-baseload operation in nuclear power plants: load following and frequency control modes of flexible operation. *IAEA: website*. 2018. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1756_web.pdf (date of access: 08.09.2025).

16. Opportunities and challenges for nuclear-renewable hybrid energy systems: preprint. *NREL: website*. 2019. URL: https://docs.nrel.gov/docs/fy19osti/72004.pdf (date of access: 08.09.2025).

17. The role of flexible nuclear energy systems in a low-carbon energy future. *OECD NEA: website*. 2020. URL: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_40641/the-role-of-flexible-nuclear-energy-systems-in-a-low-carbon-energy-future (date of access: 08.09.2025).

18. Recommended practice for the implementation of renewable energy forecasting solutions. Part 2 (2nd ed.). *IEA Wind Task 36: website*. 2022. URL: https://iea-wind.org/wp-content/uploads/2022/05/IEAWind_Task36_Recommended_Practice_Part2_2nd_Edition_ExCo_ReviewVersion-1.pdf (date of access: 08.09.2025).

19. Hybrid energy systems: opportunities for coordinated research. *National Renewable Energy Laboratory (NREL): website*. 2021. URL: https://docs.nrel.gov/docs/fy21osti/77503.pdf (date of access: 08.09.2025).

20. The onshore wind potential of the EU and neighbouring countries (ENSPRESO 2). *Joint Research Centre (JRC), European Commission: website*. 2025. URL: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC139999/JRC139999_01.pdf (date of access: 08.09.2025).

21. Solar, wind, and load forecasting dataset for MISO, NYISO, and SPP. *National Renewable Energy Laboratory (NREL): вебсайт*. 2024. URL: https://docs.nrel.gov/docs/fy24osti/83828.pdf (дата звернення: 04.09.2025).

22. Wind power forecasting error distributions. *National Renewable Energy Laboratory (NREL): вебсайт*. 2012. URL: https://docs.nrel.gov/docs/fy12osti/56130.pdf (дата звернення: 04.09.2025).

23. Électricité de France: the contribution of French nuclear fleet to the flexibility of the electric system. *NICE Future: вебсайт*. 2020. URL: https://www.nice-future.org/docs/nicefuturelibraries/default-document-library/france.pdf (дата звернення: 04.09.2025).

24. BWRX-300 fact sheet. *GE Vernova: вебсайт*. 2023. URL: https://www.gevernova.com/content/dam/gepower-nuclear/global/en_US/documents/product-fact-sheets/GE%20Hitachi_BWRX-300%20Fact%20Sheet.pdf (дата звернення: 04.09.2025).

25. NuScale small modular reactors – energy session presentation (PNWER Summit). *PNWER: вебсайт*. 2017. URL: https://www.pnwer.org/uploads/2/3/2/9/23295822/charles_mercinkiewicz-_energy_session.pdf (дата звернення: 04.09.2025).

26. NuScale small modular reactor integration for hydrogen and ammonia production (WP-178373 Rev 1). *NuScale Power: вебсайт*. 2025. URL: https://www.nuscalepower.com/hubfs/Website/Files/Technical%20Publications/nuscale-small-modular-reactor-integration-for-hydrogen-and-ammonia-production.pdf (дата звернення: 04.09.2025).

27. Technical and economic aspects of load following with nuclear power plants. *OECD NEA: вебсайт*. 2021. URL: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_62445/technical-and-economic-aspects-of-load-following-with-nuclear-power-plants (дата звернення: 04.09.2025).

28. Advanced load following control (ALFC) for PWRs. *Framatome: website*. 2019. URL: https://www.framatome.com/solutions-portfolio/docs/default-source/default-document-library/product-sheets/a0655-p-ge-g-en-0655-201901-advanced-load-following-control.pdf (date of access: 04.09.2025).

References

1. Korostin, O. (2024). Application of NLP technologies for data extraction from text messages in maritime logistics. *The Scientific Heritage, 141*, 42–45. https://doi.org/10.5281/zenodo.12908100

2. Korostin, O. (2024). Optimization of maritime transportation routes using artificial intelligence: Analysis of opportunities and challenges. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production, 56,* 31–38. https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-03

3. Pavlovskyi, M. (2024). The improvement of fuel efficiency and environmental characteristics of diesel engine by using biodiesel fuels. In S. Boichenko, A. Zaporozhets, A. Yakovlieva, & I. Shkilniuk (Eds.), *Modern technologies in energy and transport. Studies in systems, decision and control* (Vol. 510, pp. 37–47). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_4

4. Chmielarz, P. (2022). Problematyka mediacji w sprawach społecznych i gospodarczych [Problems of mediation in social and economic matters]. *Studia Politologica – Political Science Studies, 370(28),* 45–60. Retrieved from https://www.ceeol.com/search/article-detail?id=1227519 [in Polish].

5. Chmielarz, P. (2023). Analiza bezpieczeństwa energetycznego Rzeczypospolitej Polskiej w zakresie dostaw gazu ziemnego w latach 2015–2021 w powiązaniu z działaniami politycznymi oraz prawnymi [Analysis of the energy security of the Republic of Poland in the field of natural gas supplies in 2015–2021 in connection with political and legal actions]. *Rocznik Integracji Europejskiej – Yearbook of European Integration, 17,* 197–206. https://doi.org/10.14746/rie.2023.17.12 [in Polish].

6. Marynushkin, B. (2024). Osoblyvosti malykh modulnykh reaktoriv (MMR) [Features of small modular reactors (SMR)]. *Universum, 9,* 276–282. Retrieved from https://archive.liga.science/index.php/universum/article/download/1115/1127 [in Ukrainian].

7. Sharaievskyi, I. H., Vlasenko, T. S., Zimin, L. B., Nosovskyi, A. V., Fialko, N. M., & Sharaievskyi, H. I. (2022). Metalofizychni problemy nadiinosti zvariuvalnykh ziednan korpusiv reaktoriv VVER [Metallophysical problems of reliability of welded joints of VVER reactor vessels]. *Yaderna enerhetyka ta dovkillia – Nuclear Energy and the Environment, 3,* 3–15. https://doi.org/10.31717/2311-8253.22.3.1 [in Ukrainian].

8. Michaelson, D., & Jiang, J. (2021). Review of integration of small modular reactors in renewable energy microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 152,* 111638. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111638

9. Michaelson, D., & Jiang, J. (2022). Integration of small modular reactors into renewable energy-based standalone microgrids: An energy management perspective. *IEEE Power and Energy Magazine, 20*(2), 57–63. https://doi.org/10.1109/MPE.2021.3134149

10. Gabbar, H. A., & Esteves, O. L. A. (2022). Real-time simulation of a small modular reactor in-the-loop within nuclear-renewable hybrid energy systems. *Energies, 15*(18), 6588. https://doi.org/10.3390/en15186588

11. Abushamah, H. A. S., Burian, O., Ray, D., & Škoda, R. (2024). Integration of district heating systems with small modular reactors and organic Rankine cycle including energy storage: Design and energy management optimization. *Energy Conversion and Management, 322*, 119138. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119138

12. Poudel, B., & Gokaraju, R. (2021). Small modular reactor (SMR) based hybrid energy system for electricity & district heating. *IEEE Transactions on Energy Conversion, 36*(4), 2794–2802. https://doi.org/10.1109/TEC.2021.3079400

13. El-Emam, R. S., & Subki, M. H. (2021). Small modular reactors for nuclear-renewable synergies: Prospects and impediments. *International Journal of Energy Research, 45*(11), 16995–17004. https://doi.org/10.1002/er.6838

14. Simoglou, C. K., Kaissas, I. M., & Biskas, P. N. (2025). Assessing the implications of integrating small modular reactors in modern power systems. *Energies, 18*(10), 2578. https://doi.org/10.3390/en18102578

15. International Atomic Energy Agency (IAEA). (2018). *Non-baseload operation in nuclear power plants: Load following and frequency control modes of flexible operation*. Retrieved from https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1756_web.pdf

16. National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2012). *Wind power forecasting error distributions*. Retrieved from https://docs.nrel.gov/docs/fy12osti/56130.pdf

17. Pacific Northwest Economic Region (PNWER). (2017). *NuScale small modular reactors – Energy session presentation (PNWER Summit).* Retrieved from https://www.pnwer.org/uploads/2/3/2/9/23295822/charles_mercinkiewicz-_energy_session.pdf

18. National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2019). *Opportunities and challenges for nuclear-renewable hybrid energy systems: Preprint*. Retrieved from https://docs.nrel.gov/docs/fy19osti/72004.pdf

19. Framatome. (2019). *Advanced load following control (ALFC) for PWRs*. Retrieved from https://www.framatome.com/solutions-portfolio/docs/default-source/default-document-library/product-sheets/a0655-p-ge-g-en-0655-201901-advanced-load-following-control.pdf

20. Électricité de France. (2020). *The contribution of French nuclear fleet to the flexibility of the electric system. NICE Future*. Retrieved from https://www.nice-future.org/docs/nicefuturelibraries/default-document-library/france.pdf

21. OECD NEA. (2020). *The role of flexible nuclear energy systems in a low-carbon energy future*. Retrieved from https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_40641/the-role-of-flexible-nuclear-energy-systems-in-a-low-carbon-energy-future

22. National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2021). *Hybrid energy systems: Opportunities for coordinated research*. Retrieved from https://docs.nrel.gov/docs/fy21osti/77503.pdf

23. OECD NEA. (2021). *Technical and economic aspects of load following with nuclear power plants*. Retrieved from https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_62445/technical-and-economic-aspects-of-load-following-with-nuclear-power-plants

24. IEA Wind Task 36. (2022). *Recommended practice for the implementation of renewable energy forecasting solutions. Part 2* (2nd ed.). Retrieved from https://iea-wind.org/wp-content/uploads/2022/05/IEAWind_Task36_Recommended_Practice_Part2_2nd_Edition_ExCo_ReviewVersion-1.pdf

25. GE Vernova. (2023). *BWRX-300 fact sheet*. Retrieved from https://www.gevernova.com/content/dam/gepower-nuclear/global/en_US/documents/product-fact-sheets/GE%20Hitachi_BWRX-300%20Fact%20Sheet.pdf

26. National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2024). *Solar, wind, and load forecasting dataset for MISO, NYISO, and SPP*. Retrieved from https://docs.nrel.gov/docs/fy24osti/83828.pdf

27. Joint Research Centre (JRC), European Commission. (2025). *The onshore wind potential of the EU and neighbouring countries (ENSPRESO 2)*. Retrieved from https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC139999/JRC139999_01.pdf

28. NuScale Power. (2025). *NuScale small modular reactor integration for hydrogen and ammonia production (WP-178373 Rev 1)*. Retrieved from https://www.nuscalepower.com/hubfs/Website/Files/Technical%20Publications/nuscale-small-modular-reactor-integration-for-hydrogen-and-ammonia-production.pdf

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 23.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 621.321 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.3

Є. О. БАГАНОВ
кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-8771-5735

Н. Л. ДОН
кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-9503-5326

І. Ф. ПОГРЕБНЯК
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-0935-1168

О. О. КОРНІЄНКО
здобувач першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
кафедри програмних засобів і технологій
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0002-3145-4382

СВІТЛОТЕХНІЧНІ РОЗРАХУНКИ МЕРЕЖІ ОСВІТЛЕННЯ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛЮВАННЯ В DIALUX EVO

У статті представлено результати впровадження сучасних інформаційних технологій моделювання для виконання світлотехнічних розрахунків при розробці системи електропостачання промислового підприємства в освітньому процесі при підготовці фахівців першого (бакалаврського) рівня освіти зі спеціальності G3. Електрична інженерія (141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка).

З використанням моделювання в DIALux Evo при виконанні світлотехнічних розрахунків розроблено оптимальну мережу загального освітлення цеху промислового підприємства, яка відповідає чинним вимогам та діючим галузевим нормам. На прикладі мережі загального освітлення зварювального цеху заводу важкого машинобудування показано, що спеціалізований програмний пакет DIALux Evo дозволяє працювати з різноманітними джерелами світла, моделювати їх взаємодію з навколишнім середовищем і отримувати точні світлотехнічні розрахунки, які допомагають оптимізувати мережу загального освітлення цеху та систему електропостачання промислового підприємства відповідно.

За результатами світлотехнічного розрахунку мережі освітлення зварювального цеху за методом питомої потужності розрахункова потужність мережі освітлення на основі світлодіодних ламп склала 4,3 кВт; за результатами світлотехнічного розрахунку на базі проведеного моделювання в DIALux Evo розрахункова потужність мережі освітлення на основі світлодіодних ламп склала 5,6 кВт. Відповідно, показано, що розробка освітлення в Dialux EVO дає важливе уточнення в розрахунках і є ефективним методом.

Зазначено, що впровадження сучасних технологій моделювання в освітній процес під час виконання курсової роботи з освітньої компоненти «Електропостачання» покращує професійні навички здобувачів освіти зі спеціальності G3. Електрична інженерія (141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) та підвищує конкурентоспроможність на ринку праці.

Ключові слова: *системи електропостачання цеху промислового підприємства, розробка мережі освітлення цеху, світлотехнічний розрахунок, освітленість, моделювання, DIALux Evo.*

© Баганов Є. О., Дон Н. Л., Погребняк І. Ф., Корнієнко О. О., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Ye. A. BAGANOV
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Energy, Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-8771-5735

N. L. DON
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy, Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-9503-5326

I. F. POGREBNIAK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy, Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0003-0935-1168

O. O. KORNIIENKO
Student of the First (Bachelor's) Level of Higher Education
Department of Program Tools and Technologies
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0002-3145-4382

LIGHTING CALCULATIONS OF LIGHTING NETWORKS POWER SUPPLY SYSTEMS USING MODELING IN DIALUX EVO

The article presents the results of the introduction of modern information technologies of modeling for the performance of lighting calculations in the development of the power supply system of an industrial enterprise in the educational process in the training of specialists of the first (bachelor's) level of education in the specialty G3. Electrical Engineering (141. Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics).

With the use of modeling in DIALux Evo when performing lighting calculations, an optimal network of general lighting of the workshop of an industrial enterprise has been developed, which meets the current requirements and current industry standards. On the example of the general lighting network of the welding shop of a heavy engineering plant, it is shown that the specialized software package DIALux Evo allows you to work with a variety of light sources, simulate their interaction with the environment and obtain accurate lighting calculations that help optimize the general lighting network of the workshop and the power supply system of an industrial enterprise, respectively.

According to the results of the lighting calculation of the lighting network of the welding shop using the specific power method, the design power of the lighting network based on LED lamps was 4.3 kW; according to the results of the lighting calculation based on the simulation carried out in DIALux Evo, the design power of the lighting network based on LED lamps was 5.6 kW. Accordingly, it is shown that the development of lighting in Dialux EVO provides an important clarification in the calculations and is an effective method.

It is noted that the introduction of modern modeling technologies into the educational process during the course work on the educational component "Power Supply" improves the professional skills of students in the specialty G3. Electrical Engineering (141. Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics) and increases competitiveness in the labor market.

Key words: *power supply systems of an industrial enterprise workshop, development of a workshop lighting network, lighting calculation, illumination, modeling, DIALux Evo.*

Постановка проблеми

Сучасне промислове підприємство – це складний комплекс електротехнічних пристроїв з високим ступенем автоматизації, що висуває високі вимоги до надійності електропостачання, дотримання правил електробезпеки, якості електроенергії [1].

Системою електропостачання промислового підприємства є сукупність пристроїв для виробництва, передачі і розподілу електроенергії, які створюються для забезпечення живлення електроенергією приймачів. До системи електропостачання відносяться силова мережа (установка) та мережа освітлення (освітлювальна установка) [1].

Розрахункова потужність освітлювальної установки визначається на підставі світлотехнічного розрахунку після вибору потужності і кількості світильників, тобто відповідно до встановленої потужності світильників [2, 3].

Наразі при розробці оптимальної системи електропостачання є очевидною потреба у високоякісних інструментах для проєктування, моделювання та оптимізації таких систем. Саме в цьому контексті прикладне програмне

забезпечення відіграє важливу роль, надаючи інженерам та проєктувальникам потужний інструментарій для розробки [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні інформаційні технології надають безліч рішень для планування освітлення в різних приміщеннях та відкритих просторах. Одним із найкращих програмних пакетів для розрахунку освітлення на ринку програмного забезпечення є спеціалізований програмний пакет для автоматизації та стандартизації розрахунків освітлення DIALux німецької фірми DIAL [4, 5].

DIALux працює на всіх поточних платформах Windows і безперервно ведеться поліпшення програми кваліфікованої групою розробників. DIALux розповсюджується безкоштовно [5].

DIALux проводить розрахунок всіх необхідних світлових характеристик: яскравості, всіх видів освітленості, показників блискучості, КПО тощо. З його допомогою можна розрахувати денне світло і тіні при плануванні освітлення. Програма приймає до уваги географічне розташування будівлі, погодні умови і тіні від навколишніх будівель і інших об'єктів [5].

Це дає можливість правильно спроєктувати та точно визначити необхідну кількість освітлювального обладнання та місця їх встановлення відповідно до норм і стандартів.

DIALux виконує світлотехнічні розрахунки, враховуючи безліч факторів, які не враховуються при проєктуванні освітленості за табличними методами. DIALux дозволяє оцінити результат для різного виду діаграм розподілу освітленості і тривимірної візуалізації. У DIALux вбудований візуалізатор Pov-ray, що дозволяє отримати фотореалістичне тривимірне зображення розподілу освітленості. Є можливість імпорту планів та експорту результатів розрахунку в AutoCAD. DIALux враховує всі сучасні вимоги до дизайну та розрахунку освітлення, відповідно підтримує міжнародні та національні стандарти європейських країн [4].

Одним із інструментів DIALux є високоефективний додаток DIALux Evo, який пропонує широкий спектр можливостей для ефективного проєктування освітлення в різних приміщеннях. Зокрема, в DIALux Evo можна змоделювати детальні візуалізації, що дозволяють бачити результат роботи освітлювальної установки в режимі реального часу [4].

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є аналіз ефективності використання сучасних технологій моделювання для виконання світлотехнічних розрахунків при розробці системи електропостачання промислового підприємства.

Викладення основного матеріалу дослідження

В Херсонському національному технічному університеті при підготовці здобувачів першого (бакалаврського) рівня освіти за спеціальністю G3. Електрична інженерія (141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) передбачено виконання курсової роботи з освітньої компоненти «Електропостачання» за темою «Розробка системи електропостачання промислового підприємства».

Вихідними даними до розробки системи електропостачання є: генеральний план промислового підприємства, план цеху, перелік установленого обладнання (кількість, потужність та режими роботи електроприймачів цеху).

Наприклад, при розробці системи електропостачання заводу важкого машинобудування передбачається розробка мережі освітлення зварювального цеху. План зварювального цеху та його силова мережа, розроблена в процесі проєктування, наведені на рис. 1.

В AutoCAD згідно до плану розташування та специфіки електроприймачів [1] (установленого обладнання) створено 3D-модель зварювального цеху (рис. 2), яку імпортовано до DIALux Evo [4] для подальшого світлотехнічного розрахунку.

При розміщенні освітлювальних приладів у виробничих приміщеннях необхідно враховувати такі основні умови: створення нормованої освітленості найбільш економічним шляхом; дотримання вимог до якості освітлення (рівномірність, направлення світла, обмеження тіні, пульсації освітленості, а також прямий і відображений блиск), безпечний і зручний доступ для обслуговування, найменшу протяжність та зручність монтажу групової мережі; надійність кріплення освітлювальних приладів [3].

Якщо врахувати вимоги [1, 2] до мережі освітлення виробничих приміщень, порядок світлотехнічного розрахунку є наступним [3]:

– вибір систем і видів освітлення;
– вибір величини освітленості згідно вимог чинних нормативних документів;
– вибір типів джерел світла;
– вибір типів освітлювальних приладів;
– визначення кількості освітлювальних приладів та їх оптимальне розміщення, які забезпечують нормовану в [2] освітленість (з урахуванням коефіцієнту запасу).

Виробниче освітлення розділяють на природне та штучне. При можливості віддається перевага природному освітленню, оскільки воно є найбільш сприятливим для зору людини і краще розсіюється [2].

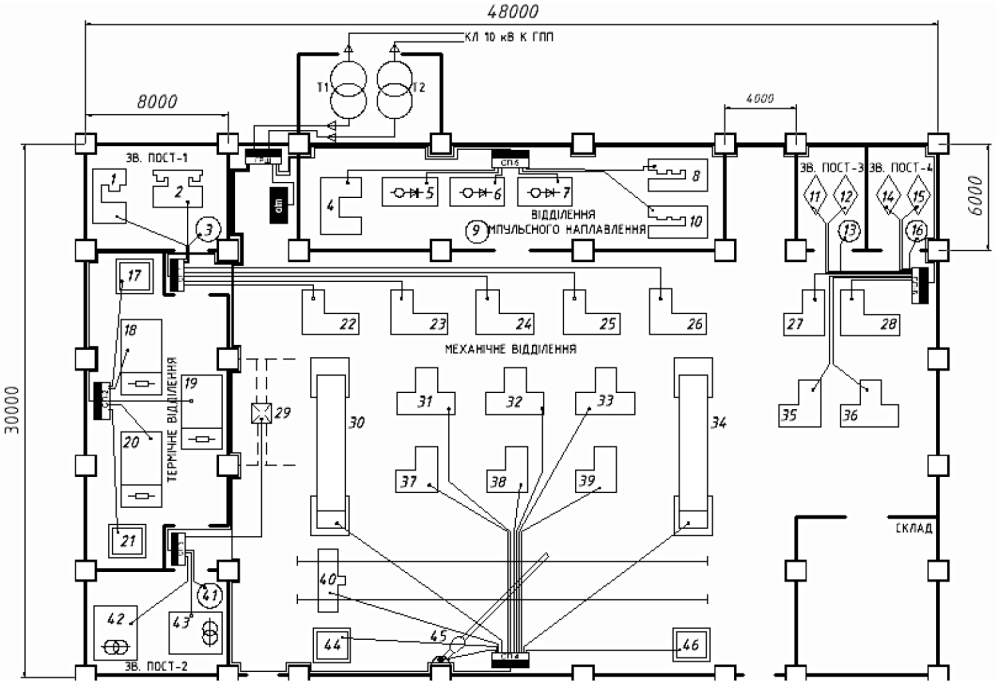


Рис. 1. План електропостачання зварювального цеху

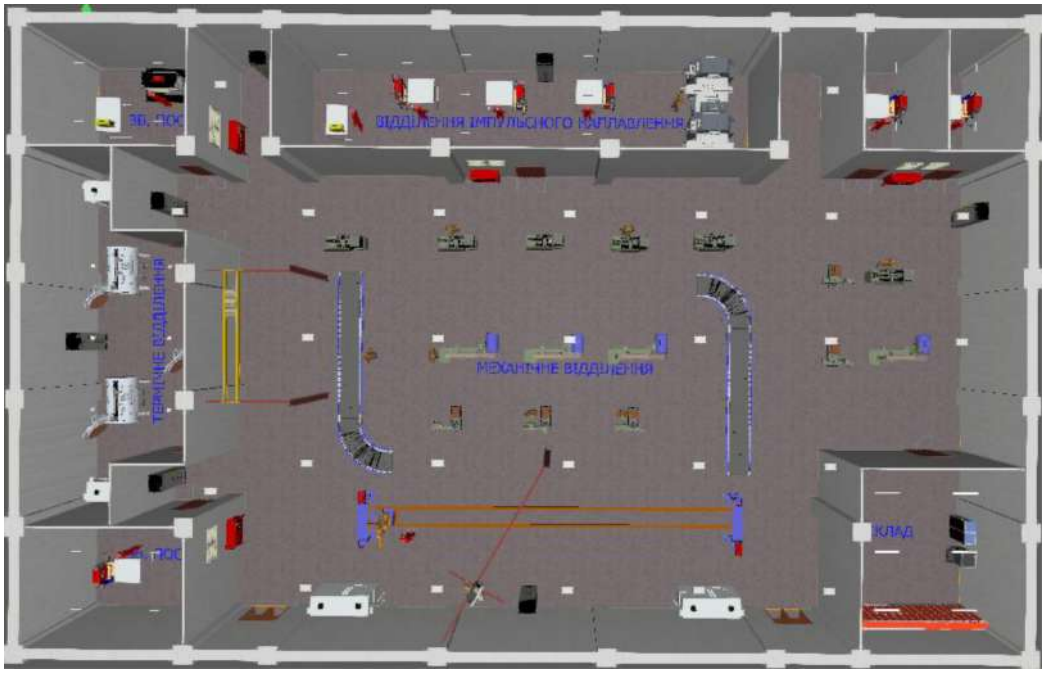


Рис. 2. Зварювальний цех із 3D-моделями обладнання, отримані моделюванням в DIALux Evo [4]

У зварювальному цеху, згідно з його планом, не передбачена установка вікон, тому виробниче освітлення можливо виконати лише штучним.

Більша частина механічного відділення зварювального цеху займається обробкою металів та заготовок. Характеристика зорової роботи – середньої точності, розряд зорової роботи – четвертий. Відповідно, при загальному освітленні норма освітленості – 300 лк [2].

На рис. 3 наведено вигляд приміщень та ізолінії освітленості механічного відділення зварювального цеху, отримані моделюванням DIALux Evo [4]. Згідно до результатів розрахунку прийнято до встановлення у механічному відділенні зварювального цеху світильники Philips BY481P LED250S/840 PSD WB GC SI, які рекомендовано встановлювати у приміщеннях промислового призначення з високими стелями [2].

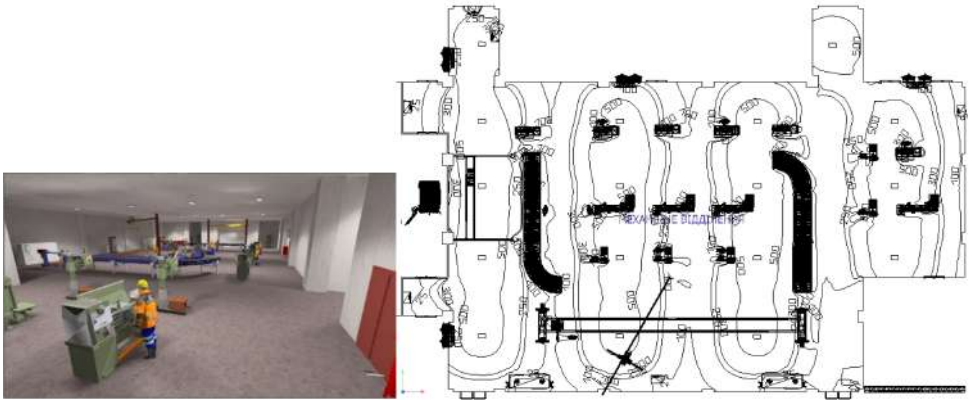


Рис. 3. Вигляд приміщень та ізолінії освітленості механічного відділення зварювального цеху, отримані моделюванням в DIALux Evo [4]

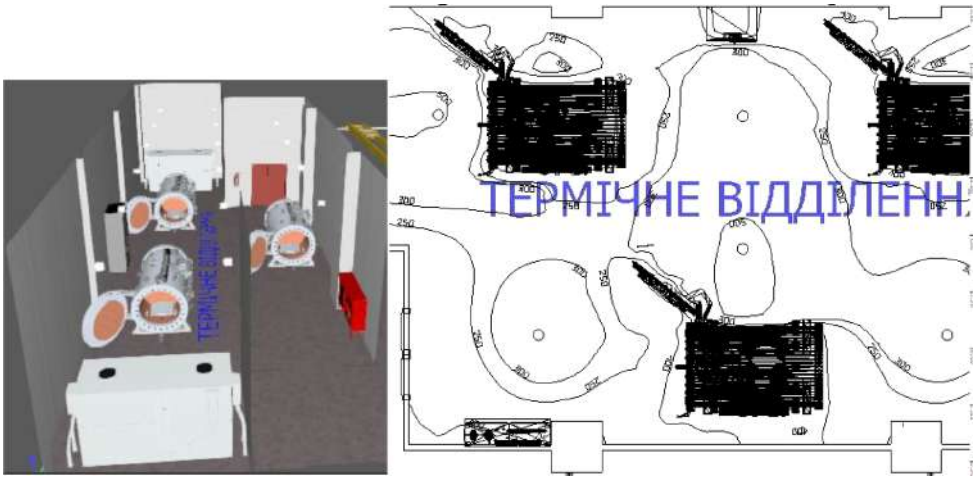


Рис. 4. Вигляд приміщень та ізолінії освітленості термічного відділення зварювального цеху, отримані моделюванням в DIALux Evo DIALux Evo [4]

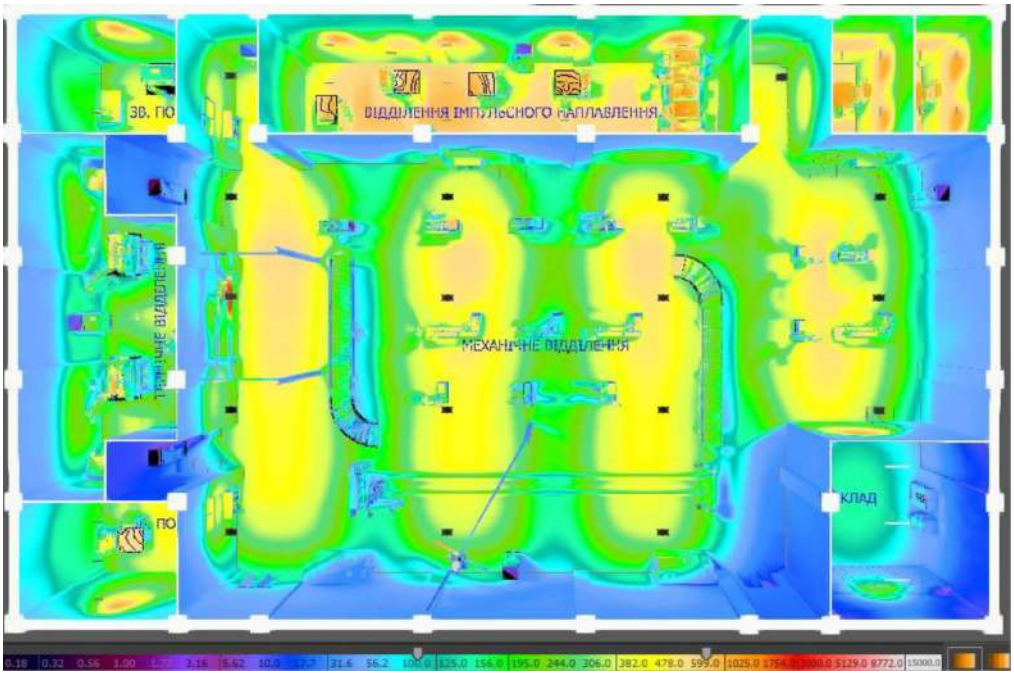


Рис. 5. Розподіл освітленості зварювального цеху, отриманий моделюванням в Dialux EVO

На рис. 4 наведено вигляд приміщень та ізолінії освітленості термічного відділення зварювального цеху, отримані моделюванням DIALux Evo [4]. У термічному відділенні прийнято до встановлення вибухозахищені світильники, які забезпечують стабільну продуктивність у вибухонебезпечних середовищах. На рис. 5 наведено розподіл освітленості зварювального цеху, отриманий моделюванням в DIALux Evo [4].

За результатами світлотехнічного розрахунку мережі освітлення зварювального цеху за методом питомої потужності згідно методики [2] розрахункова потужність мережі освітлення на основі світлодіодних ламп склала 4,3 кВт.

За результатами світлотехнічного розрахунку мережі освітлення зварювального цеху на базі проведеного моделювання в DIALux Evo [4] розрахункова потужність мережі освітлення на основі світлодіодних ламп склала 5,6 кВт. Можна констатувати, що розробка освітлення в Dialux EVO [4] дає важливе уточнення в розрахунках і є ефективним методом.

Висновки

В роботі проведено аналіз ефективності використання сучасних технологій моделювання для виконання світлотехнічних розрахунків при розробці системи електропостачання промислового підприємства.

Зокрема, з використанням моделювання в DIALux Evo в світлотехнічних розрахунках розроблено оптимальну мережу освітлення цеху промислового підприємства, яка відповідає чинним вимогам та галузевим нормам.

На основі проведеного дослідження показано, що DIALux Evo дозволяє працювати з різноманітними джерелами світла, моделювати їх взаємодію з навколишнім середовищем і отримувати точні світлотехнічні розрахунки, які допомагають оптимізувати мережу освітлення і систему електропостачання відповідно.

З іншого боку, використання DIALux Evo в освітньому процесі при підготовці фахівців зі спеціальності G3. Електрична інженерія (141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) покращує професійні навички здобувачів освіти та підвищує конкурентоспроможність на ринку праці.

Список використаної літератури

1. ДСТУ Б В.2.2-29:2011 Будівлі підприємств. Параметри. [Чинний від 2012-12-01 року] / Мінрегіон України. К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2012 [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_2_2_29/5-1-0-1146 (дата звернення: 24.08.2025). Назва з екрана.

2. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення [Чинний від 2019.02.28] / Мінрегіон України. К.: Укрархбудінформ, 2018 [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074958732556240833?doc_type=2 (дата звернення: 24.08.2025). Назва з екрана.

3. Основи світлотехніки [Електронний ресурс]. Режим доступу: elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/ЕНП Основи світлотехніки/ (дата звернення: 24.08.2025). Назва з екрана.

4. DIALux: the worldwide leading lighting design software [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.dialux.com/en-GB/ (дата звернення: 24.08.2025). Назва з екрана.

5. Free DIALux basic course [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.dialux.com/en-GB/free-dialux-basic-course (дата звернення: 24.08.2025). Назва з екрана.

References

1. DSTU B V.2.2-29:2011 Industrial buildings. Parameters. [Effective from 2012-12-01 roku] / Ministry of Regional Development of Ukraine. K.: Ministry of Regional Development, Construction, and Housing and Communal Services of Ukraine, 2012 [Electronic resource]. Access mode: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_2_2_29/5-1-0-1146 (last access: 24.08.2025). Title from the screen.

2. DBN V.2.5-28:2018. Natural and artificial lighting [Effective from 2019.02.28] / Ministry of Regional Development of Ukraine. K.: Ukrainian Construction Information Agency, 2018 [Electronic resource]. Access mode: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074958732556240833?doc_type=2 (last access: 24.08.2025). Title from the screen

3. Fundamentals of lighting technology [Electronic resource]. Access mode: elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/ ENP Fundamentals of Lighting Technology / (last access: 24.08.2025). Title from the screen.

4. DIALux: the worldwide leading lighting design software [Electronic resource]. Access mode: https://www.dialux.com/en-GB/ (last access: 24.08.2025). Title from the screen.

5. Free DIALux basic course [Electronic resource]. Access mode: https://www.dialux.com/en-GB/free-dialux-basic-course (last access: 24.08.2025). Title from the screen.

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 20.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 54-126:504 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.4

Н. М. БЕРЕЗНЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри екологічного менеджменту та підприємництва
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
ORCID: 0000-00003-4589-3829

ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНИЙ АСПЕКТ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙ, ЩО БІОЛОГІЧНО РОЗКЛАДАЮТЬСЯ З ДОДАВАННЯМ КРОХМАЛЮ

У даній роботі розглянуто задачі, пов'язані з утилізацією полімерних відходів, а також труднощі щодо їх рециклінгу, проведено аналіз існуючих підходів для оптимізації процесу створення полімерних композицій, що біологічно розкладаються з додаванням крохмалю, досліджено вплив кількості крохмалю на фізико-механічні та реологічні характеристики полімерної композиції на основі поліетилену. Проілюстровано тенденції, які обумовили необхідність розробки інноваційних матеріалів, здатних розкладатися на нешкідливі речовини (вода, біомаса та ін..) під дією навколишнього середовища (світло, волога, мікроорганізми та ін.), які стали екологоорієнтованим засобом для вирішення проблеми утворення та накопичення твердих полімерних відходів.

Проаналізовано сучасні тенденції досліджень та застосування полімерних композицій на основі крохмалю, що біологічно розкладаються, підкреслюючи їхній потенціал для сприяння сталому розвитку та екологічно чистим полімерним матеріалам у різних галузях промисловості. Також проаналізовано способи модифікації крохмалю перед введенням в полімерну композицію, визначено, що фізичні способи модифікації крохмалю є економічно більш доступними та дешевшими, ніж методи хімічної модифікації, і не утворюють стічних вод, що містять солі, реагенти або побічні продукти реагентів, що є доцільним з екологічної точки зору.

В представленій роботі застосовано методику одержання композицій з поліетилену, севілену, крохмалю, стеарату кобальту та лимонної кислоти. Визначено, що розпад полімерних композицій які біологічно розкладаються впливає на зміну фізико-механічних показників, які залежать від виду добавок та його характеристик, структури, що сформована під час переробки матеріалу та ін. Показано вплив ультрафіолетового випромінювання та дії мікроорганізмів на розклад поліетиленової композиції з вмістом крохмалю. Визначено, що після витримування композиції в компості, розклад поліетиленової композиції з вмістом крохмалю проходить більш інтенсивно у порівнянні з впливом ультрафіолетового опромінення.

Ключові слова: *полімерні відходи, крохмаль, полімери, що біологічно розкладаються, біополімери, управління відходами.*

N. M. BEREZNENKO
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Environmental Management
and Entrepreneurship
Taras Shevchenko National University of Kyiv
ORCID: 0000-00003-4589-3829

ECOLOGICAL AND ECONOMIC ASPECT OF THE EFFICIENCY OF THE APPLICATION OF POLYMER COMPOSITIONS THAT ARE BIODEGRADABLE WITH THE ADDITION OF STARCH

This paper considers the problems associated with the utilization of polymer waste, as well as the difficulties of recycling it, analyzes existing approaches to optimizing the process of creating biodegradable polymer compositions with the addition of starch, and investigates the effect of the amount of starch on the physical, mechanical, and rheological characteristics of a polyethylene-based polymer composition. It illustrates the trends that have led to the need to develop innovative materials capable of decomposing into harmless substances (water, biomass, etc.) under the influence of the environment (light, moisture, microorganisms, etc.), which have become an environmentally friendly means of solving the problem of the formation and accumulation of solid polymer waste.

The current trends in research and application of biodegradable starch-based polymer compositions are analyzed, highlighting their potential to contribute to sustainable development and environmentally friendly polymer materials in various industries. Methods of starch modification before introduction into the polymer composition are also analyzed, it is determined that physical methods of starch modification are economically more accessible and cheaper than chemical modification methods, and do not generate wastewater containing salts, reagents or reagent by-products, which is environmentally appropriate.

© Березненко Н. М., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

In the presented work, a method of obtaining compositions from polyethylene, sevilen, starch, cobalt stearate and citric acid was applied. It was determined that the decomposition of biodegradable polymer compositions affects the change in physical and mechanical parameters, which depend on the type of additives and their characteristics, the structure formed during material processing, etc. The effect of ultraviolet radiation and the action of microorganisms on the decomposition of a polyethylene composition containing starch is shown. It was determined that after the composition is kept in compost, the decomposition of the polyethylene composition containing starch is more intensive compared to the effect of ultraviolet radiation.

Key words: *polymer waste, starch, polymers, biodegradable, biopolymers, waste management.*

Постановка проблеми

Проблема захисту зовнішнього середовища набуває глобального характеру. А саме, серйозну занепокоєність викликає швидкий і практично не керований ріст споживання синтетичних пластмас в багатьох галузях застосування, що призводить до різкого збільшення відходів. Так у 2022 р. в Україні утворилось майже 39 млн. м^3 побутових відходів, або понад 7 млн. тон. Відходи розміщуються і зберігаються на 5700 сміттєзвалищах і полігонах загальною площею майже 8 тис. га. У 2022 р. перероблено та утилізовано лише 9,9 % побутових відходів, з них: 1,66 % спалено, 8,24 % – потрапило на заготівельні пункти вторинної сировини та сміттєпереробні лінії. [1]. Найбільш прийнятним способом вирішення таких важливих питань є створення матеріалів, що розкладаються.

Керуючись підходами збереження навколишнього середовища, вже на початку 1970-х рр. науковці інтенсивно почали розвивати роботи зі створення біо-, фото- й водоруйнівних полімерів. Отримання полімерів, що біологічно розкладаються зайняло пріоритетне місце у наукових розробках. Проте роботи в цьому напрямі зіткнулися з певними складностями технологічного та економічного характерів, зокрема це неможливість поєднувати у виробах високі фізико-механічні характеристики, гарний зовнішній вигляд, здатність до швидкого руйнування й низьку вартість [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одним з варіантів досягнення компромісу між інтересами держави, екологів і підприємств може стати використання у виробництві пластикової упаковки спеціальної добавки d_2w, що забезпечує розкладання полімерів. Добавка d_2w виробляється англійською компанією Symphony (Великобританія) і застосовується у виробництві виробів з поліетилену і поліпропілену, основних матеріалів для виготовлення упаковки. Вона успішно використовується в 60 країнах світу, серед яких Канада, Великобританія, США, Франція, Італія, Бразилія, Індія і ін. Найбільшими споживачами добавки є підприємства-виробники плівок і пакетів, що поставляють свою продукцію роздрібним мережам, мережам готелів, ресторанам. Упаковкою, що містить добавку d_2w, користуються такі крупні компанії, як Walmart, Tesco, KFC, Pizza Hut, Marriott, Nescafe, ZARA і багато інших. Ефективність добавки d_2w, її безпека, допуск до контакту з харчовими продуктами, екологічність підтверджені сертифікатами провідних лабораторій і випробувальних центрів світу (наприклад, RAPRA) [3].

У багатьох країнах світу почали застосовувати в якості прискорювача біологічного розкладу полімерів добавку TDPA (TDPA – Totally Degradable Plastic Additives). Це змусить пластик легко розкладатися при похованні сміття на звалищах або при попаданні в ґрунт, крім того, його можна піддавати вторинній переробці без розкладання [4].

Не дивлячись на економічні витрати, пов`язані з переобладнанням технологгічних ліній, ціною на вихідну сировину, усвідомлюючи важливість світової екологічної проблеми та під тиском споживачів, деякі компанії взяли на себе зобов'язання зменшити вплив своєї упаковки на навколишнє середовище. Таким чином, продажі біорозкладної упаковки, зокрема в США значно збільшуються щороку [5].

Згідно з дослідженням Marketsand Markets Research, світовий ринок біорозкладного пакування до 2026 р. досягне $77,7 млрд, щорічно зростаючи на 14,5 % [6]. Це зумовлено жорсткішим екологічним регулюванням та зростанням вимог споживачів до «зеленого» пакування. Під полімерами, що біологічно розкладаються розуміється здатність матеріалу руйнуватися в природних умовах на складові, нешкідливі для навколишнього середовища під дію мікроорганізмів, УФ-випромінення, світла, сонячної радіації та інших природних факторів. Створення матеріалів, що біологічно розкладаються на основі крохмалю засноване на декількох принципах: отримання термопластичного крохмалю та виробів на його основі; отримання сумішей з синтетичними і природними полімерами; отримання похідних крохмалю екструзійним методом. На відміну від більшості пластмас, полімери, що біологічно розкладаються можуть розщеплюватися в умовах зовнішнього середовища за допомогою мікроорганізмів, бактерій та грибків. Науковцями проводяться роботи по створенню полімерних композицій, що біологічно розкладаються, зокрема серед них запропонована методика синтезу біодеградабельних плівокна основі агар-агару та молочайних рослин. Результати досліджень показали, що біодеградабельні плівки наоснові агар-агару та молочайних рослин мають гарні показники міцності, еластичності, стійкі до помірної вологості, що поряд із природнім складом і достатньо простим методом отримання робить їх перспективним матеріалом для використання в косметології, медицині, як пакувальний матеріал [7].

Крохмаль, будучи природним полісахаридом, має унікальні властивості і особливості, до числа яких відносяться: щорічне відновлення і невичерпність сировинних ресурсів для його отримання (картопля, кукурудза,

жито, пшениця, горох та ін.), що вигідно відрізняє його від целюлози, що одержується з деревини, мінімальний термін дозрівання якої навіть для швидкорослої деревини складає 18–20 років; легка змінюваність і надання нових практично цінних властивостей шляхом хімічного, фізичного, бактеріологічного або комбінованого впливу; можливість здійснення з крохмалем всіх перетворень, відомих з хімії низькомолекулярних сполук; можливість створення на основі крохмалю або в поєднанні з синтетичними полімерами нових матеріалів, що біологічно розкладаються; не токсичність і зручність роботи з крохмалем як з полімером. При створенні полімерних композицій з вмістом крохмалю, що біологічно розкладаються слід враховувати і досліджувати такі важливі показники, як вплив вмісту крохмалю, компатибілізаторів та пластифікаторів на механічні, теплові та бар'єрні характеристики сумішей. Крохмальні суміші демонструють різноманітні мікроструктури, які залежать від конкретного складу суміші та умов, за яких вона обробляється. В роботі [8] проаналізовано саме вплив мікроструктури на показники якості крохмальної суміші (міцність, в'язкість та бар'єрні властивості).

Існує досвід попередньої обробки крохмалю перед введенням в полімерну композицію. Так в роботі [9] проілюстровано, що фізична обробка впливає на розташування молекул крохмалю в гранулах. Термічна обробка, включаючи мікрохвильове випромінювання, попередню желатинізацію та термовологову обробку є найбільш широко застосовуваними фізичними процесами. Мікрохвильова обробка в основному застосовується під час виготовлення плівок з вмістом крохмалю. Мікрохвильова обробка підвищує розчинність у воді та зменшує кристалічність, в'язкість та прозорість крохмалю. Крім того, мікрохвильова обробка має ряд економічних переваг, таких як енергозбереження, висока конверсія та швидкість.

Процеси біорозкладу відходів полімерних матеріалів у природних умовах є мало вивченими із-за їхньої новизни, складності та відсутності швидкої економічної вигоди. Для їх більш глибокого дослідження необхідно проводити роботи щодо основ механізму регулювання процесом біорозкладання і мати засоби для кількісної оцінки процесів, що відбуваються.

Формулювання мети досліджень

Метою дослідження є аналіз існуючих та розробка нових науково обґрунтованих підходів для оптимізації процесу створення полімерних композицій, що біологічно розкладаються з додаванням крохмалю, дослідження впливу кількості крохмалю на фізико-механічні та реологічні характеристики полімерної композиції на основі поліетилену.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для проведення досліджень застосовано методику одержання композицій з поліетилену (ПЕВТ), севілену, крохмалю, стеарату кобальту та лимонної кислоти, рецептурний склад досліджуваних композицій наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Рецептурний склад ПЕ композицій з СЕВА, крохмалем, стеаратом кобальту та лимонною кислотою

№ з/п	Компонент № композиції	Вміст компоненту в композиції, % мас.			
		1	2	3	4
1	ПЕВТ15803-020	44	39	30	95
2	СЕВА з вмістом вінілацетату до 15 %	25	20	19	4
3	Крохмаль картопляний	30	40	50	0
4	Стеарат кобальту	0,5	0,5	0,5	0,5
5	Лимонна кислота	0,5	0,5	0,5	0,5

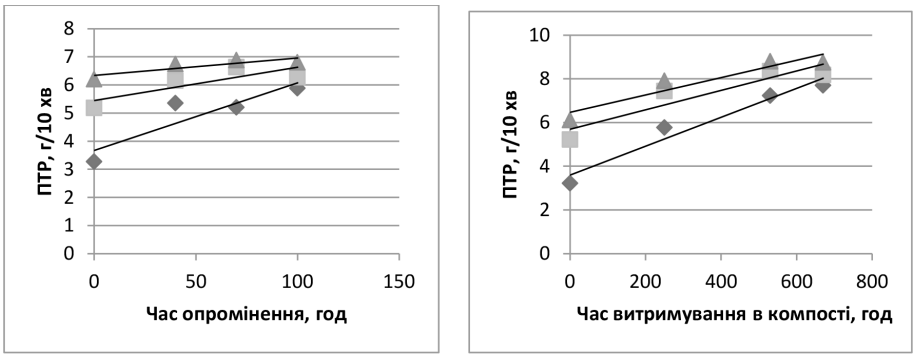
Визначення впливу ультрафіолетового (УФ) випромінювання на властивості композицій проводились опроміненням зразків нефільтрованим світлом ртутно-кварцевої лампи ДТР – 220 протягом різної кількості годин (40, 70 і 100 год.). Зразки у вигляді кругів діаметром 13 см. встановлювали в камеру для опромінювання, де підтримували температуру 20 ± 5 °С, довжина хвилі $\lambda > 300$ нм. Визначали енергетичну освітленість лампи. Лампа ДТР – 220 виробництва Полтавського заводу є газорозрядною лампою з мінімальним променевим потоком 18 Вт в діапазоні 240–320 нм. Температура на поверхні зразка підтримувалась в межах 23–25 °С тривалість випромінювання Сонцем УФ-хвиль за рік по території України дорівнює 4380 годин ($15{,}768 \cdot 10^6$ с).

Біорозклад досліджуваних полімерних композицій під дією біологічних факторів визначали при витримуванні зразків під дією біологічних факторів визначали при витримуванні зразків в компості, що був приготовлений за методикою, описаною в ДСТУ [10].

Досліджувані зразки у вигляді кругів діаметром 13 см. занурювали в компост на глибину 5–15 см від поверхні, витримували при температурі 20 ± 5 °С, кислотність ґрунту pH = 6–7,5, вологість 30 ± 5 %. При введенні в ПЕВТ різних за складом сумішей домішок, після дії УФ опромінення і витримки в компості спостерігається зміна властивостей полімеру, в тому числі реологічні характеристики – значення показника течії розплаву (ПТР), фізико-механічні характеристики - межа міцності, відносне видовження при розриві. Розклад досліджуваних ПЕ композицій

оцінювали за ПТР, порівнюючи значення до та після витримування цих композицій під УФ опроміненням та дією мікроорганізмів компосту.

На рис. 1 приведені залежності зміни ПТР ПЕ-композицій № 1 – № 3 від часу витримування під УФ опроміненням (а) і в компості (б).



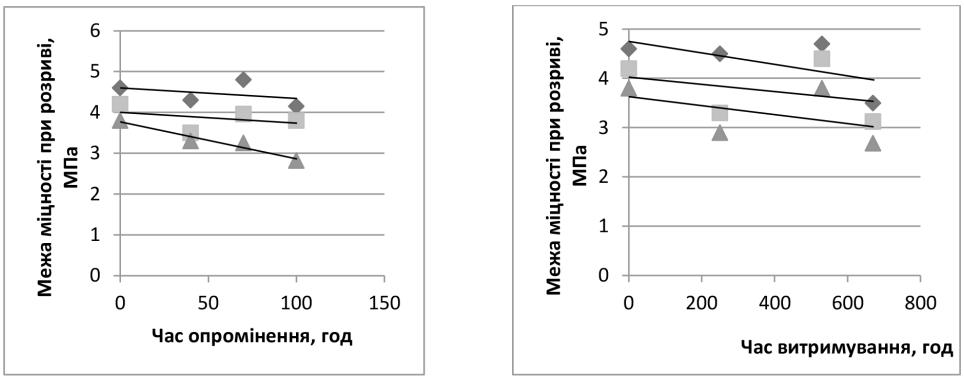
а) б)

Рис. 1. Залежності зміни ПТР ПЕ-композицій № 1 – № 3 від часу витримування під УФ опроміненням (а) і в компості (б): ♦ – для композиції № 1; ■ – для композиції № 2; ▲ – для композиції № 3

На відрізку часу витримування зразків ПЕ композицій під УФ опроміненням і в компості, а саме: 100 і 670 годин відповідно, спостерігається збільшення ПТР, причому зі збільшенням часу різниця між ПТР композицій № 1 – № 3 зменшується. Звертаємо увагу, що значення ПТР для композиції № 1 (30 % крохмалю) нижчі ніж для композиції № 2 (40 % крохмалю) і ще нижчі ніж для композиції № 3 (50 % крохмалю). Збільшення значень ПТР для всіх композицій говорить про те, що в полімерному композиційному матеріалі проходить зменшення молекулярної маси та збільшення текучості полімеру, що свідчить про розклад композицій під дією УФ опромінення та витримуванні у компості.

Розклад полімерів і композицій прискореного розкладу впливає на зміну фізико-механічних показників, які залежать від виду добавок та його характеристик, структури, що сформована під час переробки матеріалу та ін. Композиції з такими добавками як крохмаль, стеарат кобальту та лимонна кислота, характеризуються зниженням величини міцності при розриві та коефіцієнтом відносного видовження.

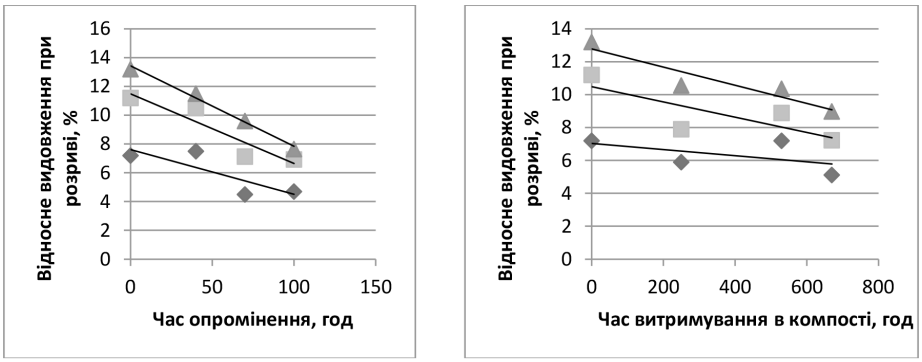
Підвищення ПТР в залежності від часу витримування в компості знаходяться в прямому зв'язку із зменшенням фізико-механічних показників композицій прискореного розкладу, які оцінювалися за межею міцності (рис. 2) та коефіцієнтом відносного видовження (рис. 3) при розриві.



а) б)

Рис. 2. Залежність межі міцності при розриві ПЕ композицій від часу опромінення (а) і витримування в компості (б): ♦ – для композиції № 1; ■ – для композиції № 2; ▲ – для композиції № 3

Зниження фізико-механічних показників пояснюється тим, що зразки в процесі розкладу втрачають деякі компоненти своєї структури за рахунок фото деструкції при дії УФ опромінення і мікроорганізмів при витримуванні їх у компості.



а) б)

Рис. 3. Залежність коефіцієнту відносного видовження при розриві ПЕ композицій від часу УФ опромінення (а) і витримування в компості (б): ♦ – для композиції № 1; ■ – для композиції № 2; ▲ – для композиції № 3

Висновки

Отже, показано вплив УФ випромінювання та дії мікроорганізмів на розклад ПЕ композиції. Визначено, що після витримування композиції в компості протягом 670 годин, розклад ПЕ композиції проходить більш інтенсивно у порівнянні з впливом УФ опромінення. Так, після компостування ПТР композиції збільшується до 8,81 г/10 хв, в той час, як після УФ опромінення ПТР складає 6,89 г/10 хв. З даних досліджень можна зробити висновок, що 100 год після УФ опромінення можна прирівняти до 200 год після витримування в компості з коефіцієнтом 1,2.

Не дивлячись на всі стримуючі економічні фактори, кількість досліджень по розробці пластичних мас, які біологічно розкладаються вказує на значні успіхи в цій області. З ростом споживання полімерів для тари і упаковки, а також інших побутових виробів одноразового використання, проблеми пластмасового сміття і його загроза навколишньому середовищу буде постійно зростати. У зв'язку з цим очікуване посилення законодавчих нормативів по обмеженню використання звичайних пластиків в якості тари і упаковки ще більше активізує розробки по створенню широкого ряду термопластів, які біологічно розкладаються з доступною ціною і необхідними властивостями.

Список використаної літератури

1. Довідка «Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2022 рік». Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. URL: http://surl.li/rwagbn

2. Морозов, А. С. (2017). Деякі структурні, економічні та екологічні аспекти переробки біорозкладальних полімерів. *Технологія і техніка друкарства*, (3(57), 53–62. https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(57).2017.102204

3. Biodegradable Plastic Technology. URL: https://www.symphonyenvironmental.com/technologies/biodegradable-plastic/

4. Біопластик ЛТД. URL: http://bioplastic.com.ua/dobavki/

5. Biodegradable Packaging Market Snapshot (2022–2032). URL: https://www.futuremarketinsights.com/reports/biodegradablepackaging-market

6. Šuput D., Popović S., Hromiš N., Ugarković J. (2021). Degradable packaging materials – sources, application and decomposition routes. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*. 25.2: 37–42.

7. Селіванова, Т., Столяренко, В., Ючинська, А., & Білецька, О. (2024). Синтез і характеристики біодеградабельних плівок на основі агар-агару. *Екологічний вісник Криворіжжя*, 8(8), 50–58. https://doi.org/10.55056/nocote.v12i0.728t

8. Poornima Singh, Vinay Kumar Pandey, Rahul Singh, Kunal Singh, Kshirod Kumar Dash, Sumira Malik, (2024). Unveiling the potential of starch-blended biodegradable polymers for substantializing the eco-friendly innovations, *Journal of Agriculture and Food Research*, Volume 15, https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101065

9. Amaraweera SM, Gunathilake C, Gunawardene OHP, Fernando NML, Wanninayaka DB, Dassanayake RS, Rajapaksha SM, Manamperi A, Fernando CAN, Kulatunga AK, Manipura A. (2021). Development of Starch-Based Materials Using Current Modification Techniques and Their Applications: A Review. *Molecules*. Nov 15;26(22):6880. doi: 10.3390/molecules26226880. PMID: 34833972; PMCID: PMC862570

10. ДСТУ EN 13255:2008 «Геотекстиль та віднесені до геотекстилю вироби».

References

1. Dovidka “Stan sfery povodzhennia z pobutovymy vidkhodamy v Ukraini za 2022 rik”. Ministerstvo rozvytku hromad, terytorii ta infrastruktury Ukrainy. [Reference “State of the sphere of household waste management in Ukraine for 2022”. Ministry of Development of Communities, Territories and Infrastructure of Ukraine.]. URL: http://surl.li/rwagbn [in Ukrainian].

2. Morozov, A. S. (2017). Deiaki strukturni, ekonomichni ta ekolohichni aspekty pererobky biorozkladalnykh polimeriv. [Some structural, economic and environmental aspects of the processing of biodegradable polymers] *Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, (3(57), 53–62. https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(57).2017.102204. [in Ukrainian].

3. Biodegradable Plastic Technology. URL: https://www.symphonyenvironmental.com/technologies/biodegradable-plastic/

4. Bioplastyk LTD. [Bioplastic LTD] URL: http://bioplastic.com.ua/dobavki/. [in Ukrainian].

5. Biodegradable Packaging Market Snapshot (2022–2032). URL: https://www.futuremarketinsights.com/reports/biodegradablepackaging-market

6. Šuput D., Popović S., Hromiš N., Ugarković J. (2021). Degradable packaging materials – sources, application and decomposition routes. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*. 25.2: 37–42.

7. Selivanova, T., Stoliarenko, V., Yuchynska, A., & Biletska, O. (2024). Syntez i kharakterystyky biodehradabelnykh plivok na osnovi ahar-aharu. [Synthesis and characterization of biodegradable films based on agar-agar.] *Ekolohichnyi visnyk Kryvorizhzhia*, 8(8), 50–58. https://doi.org/10.55056/nocote.v12i0.728t. [in Ukrainian].

8. Poornima Singh, Vinay Kumar Pandey, Rahul Singh, Kunal Singh, Kshirod Kumar Dash, Sumira Malik, (2024). Unveiling the potential of starch-blended biodegradable polymers for substantializing the eco-friendly innovations, *Journal of Agriculture and Food Research*, Volume 15, https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101065

9. Amaraweera SM, Gunathilake C, Gunawardene OHP, Fernando NML, Wanninayaka DB, Dassanayake RS, Rajapaksha SM, Manamperi A, Fernando CAN, Kulatunga AK, Manipura A. Development of Starch-Based Materials Using Current Modification Techniques and Their Applications: A Review. Molecules. 2021 Nov 15;26(22):6880. doi: 10.3390/molecules26226880. PMID: 34833972; PMCID: PMC862570.

10. DSTU EN 13255:2008 “Heotekstyl ta vidneseni do heotekstyliu vyroby”. [Geotextiles and geotextile-related products]. [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 26.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 631 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.5

Г. С. БЄЛОХА
кандидат технічних наук, доцент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-4277-367X

В. О. МУЗИКА
аспірант кафедри електропостачання
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0003-2528-8696

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В СУЧАСНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

У даній роботі розглянуто актуальність проблеми забезпечення якості електричної енергії (ЯЕ) в сучасних системах електропостачання (СЕП), що пов'язана зі зростаючою інтеграцією розосередженої генерації (РГ) та широким використанням нелінійних навантажень. Проаналізовано ключові виклики, спричинені спотворенням синусоїдальності напруги та струму вищими гармоніками, а також труднощі в управлінні реактивною потужністю та підтриманні стабільності напруги. Розглянуто комплексний аналіз проблематики гармонічних спотворень та управління реактивною потужністю в СЕП з РГ, а також демонстрація масштабу цих проблем на основі експериментальних досліджень параметрів ЯЕ на реальному промисловому об'єкті. Методика дослідження включає аналіз науково-технічної літератури та нормативних документів, що регламентують показники ЯЕ. Проведено експериментальні вимірювання на комплектній трансформаторній підстанції (КТП) прокатного стану промислового підприємства з використанням спеціалізованого аналізатора ЯЕ. Проаналізовано часові тренди напруги, струму, коефіцієнта потужності, сумарних коефіцієнтів гармонійних спотворень напруги (THDU) та струму (THDI), а також спектральний склад гармонік. За результатами дослідження встановлено, що робота потужного нелінійного навантаження (прокатний стан) призводить до суттєвих спотворень ЯЕ. Зафіксовано значне перевищення нормативних значень THDU (середні значення 12–13 %, пікові – понад 20 %) та THDI (середні значення 45–90 %, пікові – понад 100 %). Наукова новизна полягає в отриманні та аналізі актуальних експериментальних даних щодо рівнів гармонічних спотворень, генерованих сучасним потужним промисловим обладнанням, та їх комплексного впливу на показники ЯЕ в умовах реальної СЕП, що доповнює існуючі теоретичні дослідження та моделі. Практична цінність отриманих результатів полягає в обґрунтуванні обмежень застосування стандартних засобів компенсації реактивної потужності за високих рівнів гармонік та у наданні рекомендацій щодо необхідності використання активних фільтрів або пристроїв статичної генерації реактивної потужності для ефективного покращення ЯЕ на аналогічних промислових об'єктах, що сприятиме підвищенню надійності та енергоефективності їх електропостачання.

Ключові слова: *якість електроенергії, гармонічні спотворення, THD, реактивна потужність, коефіцієнт потужності, розосереджена генерація, промислові навантаження, силовой активний фільтр, інвертор.*

H. S. BIELOKHA
PhD in Engineering, Associate Professor
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0003-4277-367X

V. O. MUZYKA
Postgraduate Student at the Department of Power Supply
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0009-0003-2528-8696

ANALYSIS OF POWER SUPPLY QUALITY ISSUES IN MODERN ELECTRICAL SYSTEMS

This paper considers the urgency of the problem of ensuring the quality of electric power (EP) in modern power supply systems (PSS), which is associated with the growing integration of distributed generation (DG) and the widespread use of nonlinear loads. The key challenges caused by the distortion of voltage and current sinusoidality by higher harmonics,

© Бєлоха Г. С., Музика В. О., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

as well as difficulties in managing reactive power and maintaining voltage stability are analyzed. The purpose of the article is to comprehensively analyze the problems of harmonic distortion and reactive power control in a PPS with DG, as well as to demonstrate the scale of these problems based on experimental studies of NP parameters at a real industrial facility. The research methodology includes an analysis of scientific and technical literature and regulatory documents governing power quality indicators. Experimental measurements were made at a complete transformer substation (CTS) of the rolling mill of an industrial enterprise using a specialized power quality analyzer. Time trends of voltage, current, power factor, total harmonic distortion coefficients of voltage (THDU) and current (THDI), as well as the spectral composition of harmonics were analyzed. The study found that the operation of a powerful nonlinear load (rolling mill) leads to significant distortions of NF. A significant excess of the standard values of THDU (average values of 12–13 %, peak values of more than 20 %) and THDI (average values of 45–90 %, peak values of more than 100 %) was recorded. The scientific novelty lies in obtaining and analyzing relevant experimental data on the levels of harmonic distortion generated by modern powerful industrial equipment and their complex impact on the NP indicators in a real EPS, which complements existing theoretical studies and models. The practical value of the results obtained is to substantiate the limitations of the use of standard means of reactive power compensation at high harmonic levels and to provide recommendations on the need to use active filters or static reactive power generation devices to effectively improve the EE at similar industrial facilities, which will help to increase the reliability and energy efficiency of their power supply.

Key words: *power quality, harmonic distortion, THD, reactive power, power factor, distributed generation, industrial loads, active power filter, inverter.*

Постановка проблеми

Останніми роками електроенергетика швидко змінюється через нові технології та екологічні вимоги. Традиційна модель централізованого виробництва електроенергії поступово доповнюється моделями з розосередженою генерацією (РГ), що активно використовують відновлювані джерела енергії (ВДЕ), такі як сонячні (СЕС) та вітрові (ВЕС) електростанції. Цей перехід відкриває нові можливості для підвищення надійності та гнучкості систем електропостачання (СЕП), однак в той же час породжує низку технічних викликів, серед яких одне з ключових місць посідає забезпечення належної якості електричної енергії (ЯЕ) [1–10].

Під якістю електроенергії зазвичай розуміють здатність енергосистеми постійно постачати напругу з номінальними параметрами частоти та форми синусоїди. У реальних умовах досягнення такої якості є складним завданням через численні зовнішні та внутрішні фактори впливу. На практиці відхилення від цього ідеалу є розповсюдженим явищем, спричиненим як роботою самої системи, так і особливостями підключених навантажень. Погана якість електроенергії призводить до значних економічних та технічних проблем, включаючи підвищені втрати потужності, перегрівання, передчасне старіння та передчасний вихід з ладу електрообладнання, збої в роботі чутливих приладів та систем керування, а також зниження загальної ефективності СЕП [2, 4].

Якість електроенергії залежить від якості постачання, а також від якості споживання. Інтеграція джерел РГ, особливо тих, що підключаються до мережі через силові електронні перетворювачі, суттєво впливає на параметри ЯЕ. Нестабільний та імовірнісний характер генерації СЕС та ВЕС, зумовлений природними факторами, а також робота самих перетворювачів, стають джерелами додаткових спотворень та коливань параметрів режиму мережі. До основних проблем ЯЕ, що загострюються в умовах широкого впровадження РГ, належать спотворення форми напруги та струму (гармоніки) та проблеми пов’язані з балансом та перетоками реактивної потужності. Ці два аспекти взаємопов’язані та комплексно впливають на надійність, стабільність та економічність функціонування сучасних СЕП, особливо локальних електроенергетичних систем (ЛЕС) та мікромереж [9, 7, 6, 4].

Таким чином глибокий аналіз проблематики, пов’язаної з гармонічними спотвореннями та управлінням реактивною потужністю в мережах з РГ, є надзвичайно актуальним завданням. Розуміння джерел цих проблем, їхніх наслідків та існуючих методів оцінювання є необхідною передумовою для розробки ефективних технічних рішень та стратегій керування спрямованих на підтримання стабільної якості електропостачання в умовах переходу до нової енергетичної моделі.

Однією з найбільш значущих проблем ЯЕ в сучасних СЕП є спотворення синусоїдальності форми кривих напруги та струму, що проявляється у вигляді вищих гармонійних складових або гармонік. Гармоніки – це синусоїдальні напруги або струми, частоти яких кратні основній частоті мережі (50 або 60 Гц). Окрім гармонік, існують також інтергармоніки, субгармоніки та постійна складова [2, 6, 9].

Основним джерелом гармонік є нелінійні навантаження, струм споживання яких не є пропорційним прикладеній напрузі. До них належать пристрої силової електроніки (випрямлячі, інвертори, перетворювачі частоти, імпульсні джерела живлення, БДЖ, зарядні пристрої), інтерфейси ВДЕ (інвертори СЕС та ВЕС), специфічні промислові навантаження (дугові печі, зварювання, потужні приводи), сучасні освітлювальні прилади (люмінесцентні та LED лампи), а також насичення магнітопроводів трансформаторів та електричних машин. Висока частка комутації сучасних перетворювачів може генерувати також надгармоніки (supraharmonics) [2, 4, 6, 9, 10].

Присутність вищих гармонік у мережі призводить до додаткових втрат потужності та перегрівання елементів мережі й обладнання, зниження коефіцієнта потужності, електромагнітних завад для систем зв’язку та керування,

помилок у роботі лічильників, вібрацій та шуму в машинах і трансформаторах, прискореного старіння ізоляції та, що особливо небезпечно, до резонансних явищ, які можуть спричинити значні перенапруги та пошкодження обладнання, особливо конденсаторних батарей [2, 6, 9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для кількісної оцінки рівня гармонічних спотворень використовують показник сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень (Total Harmonic Distortion, THD), який відображає рівень спотворень напруги (THDU) або струму (THDI) відносно їх основної гармоніки. Міжнародні та національні стандарти (наприклад IEEE 519, IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-4, ДСТУ EN 50160) встановлюють граничні допустимі рівні THD та окремих гармонік для забезпечення електромагнітної сумісності (EMC) обладнання в СЕП, а стандарт IEEE 519 також встановлює ліміти на спотворення струму в точці загального приєднання співвідносячи їх з максимальним струмом навантаження споживача (Total Demand Distortion, TDD). Зазвичай, для THDU допустимий рівень обмежується 5–8 %, а ліміти для спотворень струму (THDI та TDD) залежать від параметрів мережі та навантаження [9; 2]. Особливо гостро проблема стоїть гармонік у ЛЕС та мікромережах в острівному режимі через менший демпфуючий вплив системи [9].

Реактивна потужність (РП) необхідна для роботи електрообладнання зі змінним магнітним полем (двигуни, трансформатори), а її баланс у мережі безпосередньо впливає на рівень напруги. Ефективне управління РП є ключовим для стабільності напруги, мінімізації втрат та надійної роботи СЕП [10, 4].

Основними споживачами РП є індуктивні навантаження та лінії електропередачі. Джерелами РП традиційно є синхронні генератори та БСК. Сучасні пристрої, такі як STATCOM (Static Var Generator, SVG) та інтерфейси ВДЕ, також можуть брати участь у генерації чи споживанні РП, хоча деякі інвертори ВДЕ можуть працювати з одиничним коефіцієнтом потужності, не підтримуючи напругу мережі [10, 2].

Проблеми, пов'язані з РП. Незбалансованість або надмірні перетоки РП призводять до відхилень напруги (провалів, перенапруг, коливань), збільшення втрат активної потужності через зростання повного струму, зниження пропускної спроможності мережі та, у критичних випадках, до порушення статичної та динамічної стійкості енергосистеми мережі [2, 4, 6, 10].

– Формування ЛЕС та мікромереж на основі РГ створює специфічні умови, що загострюють проблеми ЯЕ:

– Зміна потоків потужності: поява двонаправлених та реверсивних потоків потужності ускладнює регулювання напруги та роботу систем захисту.

– Низька інерція: системи з високою часткою інверторної генерації ВДЕ більш чутливі до порушень балансу потужності та відхилень частоти, особливо в острівному режимі.

– Острівний режим роботи: Хоча потенційно підвищує надійність для локальних споживачів, цей режим створює значні виклики для підтримання стабільності напруги, частоти, балансу потужності та ЯЕ. Сучасні стандарти часто вимагають швидкого відключення РГ, хоча розвиток технологій спрямований на забезпечення стабільної роботи в такому режимі [4, 5].

– Взаємний вплив та EMC: концентрація перетворювачів та нелінійних навантажень підвищує ризик проблем з EMC, вимагаючи ретельного аналізу взаємного впливу [4].

– Складність керування та моніторингу: ефективне управління ЛЕС та мікромережами протребує розгортання сучасних систем моніторингу та складних систем керування для координації, оптимізації та забезпечення стабільності [5, 9].

Отже, проблематика гармонічних спотворень та управління реактивною потужністю є невід'ємною частиною забезпечення якості електропостачання в сучасних СЕП. Зростання частки РГ та розвиток ЛЕС і мікромереж висувають нові, більш жорсткі вимоги до параметрів ЯЕ та потребують комплексного підходу до їх аналізу, моніторингу та компенсації для забезпечення надійної, ефективної та сталої роботи енергетичних систем майбутнього.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є аналіз експериментально отриманих результатів вимірювання якості електроенергії на промисловому об'єкті та розробка силового активного фільтру для покращення якості електричної енергії.

Викладення основного матеріалу дослідження

Теоретичні положення щодо негативного впливу гармонічних спотворень на роботу електричних мереж та обладнання знаходять своє підтвердження у результатах практичних вимірювань на реальних об'єктах. Як приклад, розглянемо дані аналізу якості електричної енергії, проведеного в ході експериментальних досліджень на комплектній трансформаторній підстанції (КТП 24) ТОВ «МОДУЛЬ – УКРАЇНА», що живить прокатний стан – потужне промислове навантаження з вираженим нелінійним характером споживання електроенергії. Вимірювання проводилися в період з 27.08.2024 по 28.08.2024 за допомогою приладу Pure BlackBox (Elspec).

Статистичні дані за весь період вимірювань показали, що середні значення сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень фазної напруги (THDU) становили близько 7,21–7,29 %, при цьому максимальні значення досягали 21,52–23,20 %. Це вже вказує на періодичне перевищення гранично допустимих значень, встановлених стандартом ДСТУ EN 50160 (який зазвичай обмежує THDU на рівні 8 % для низьковольтних мереж).

На реєстрограмі гармонічних спотворень лінійної напруги THDU видно, що середні значення THDU для міжфазних напруг часто перевищували 8 % і сягали 12 % та більше під час активної роботи прокатного стану (рис. 1). Максимальні ж значення фіксувалися на рівні понад 20 %.



Рис. 1. Реєстрограма зміни сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень міжфазних напруг

Спектральний аналіз (середні значення амплітуд) гармонійних складових міжфазних напруг (V12, V23, V31) показав, що домінуючою є 5-та гармоніка з амплітудою близько 5,5 % для міжфазних напруг, що характерно для мереж, які живлять напівпровідникові перетворювачі, широко використовувані в приводах прокатних станів (рис. 2).

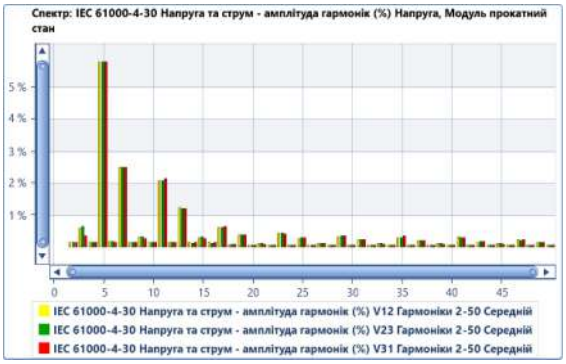


Рис. 2. Спектральний аналіз (середні значення амплітуд) гармонійних складових міжфазних напруг

Ситуація зі спотвореннями струму виявилася ще більш критичною. Середні значення THDI для фазних струмів за весь період вимірювань знаходилися в діапазоні 47,97–56,92 %, а максимальні значення по окремих фазах сягали 87,3–104,5 %. На реєстрограмі гармонічних спотворень фазних струмів THDI видно, що середні значення часто перевищували 50 %, зі значними піками (рис. 3).

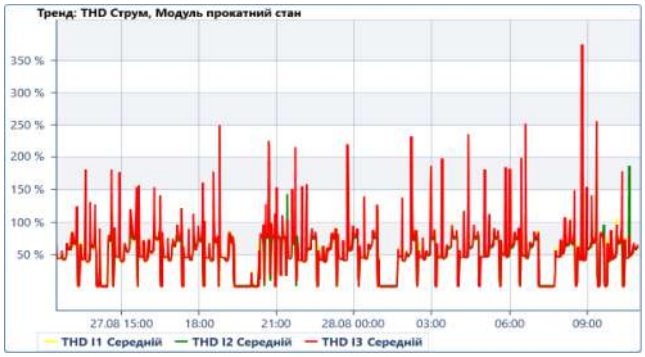


Рис. 3. Реєстрограма зміни сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень струмів

Спектральний аналіз струму (середні значення) виявив значне домінування 5-ї гармоніки (близько 40 % амплітуди) та суттєвий внесок 7-ї, 11-ї та 13-ї гармонік (рис. 4). Такі високі рівні спотворень струму є типовими для потужних нелінійних навантажень, якими є прокатні стани, і призводять до значних додаткових втрат в елементах

мережі (трансформаторах, кабелях), перегріву обладнання, підвищеного електромагнітного впливу на суміжні системи та потенційних збоїв у роботі чутливого обладнання.



Рис. 4. Спектральний аналіз (середні значення амплітуд) гармонійних складових струмів

За результатами вимірювань та аналізу статистичних даних, значення показників якості електроенергії, зокрема рівень гармонійних складових по струму та напрузі, перевищують гранично допустимі значення згідно ДСТУ EN 50160:2023 та ДСТУ IEC 61000-3-4:2009. Осцилограми напруг та струмів показано на рис. 5.

Високі середні значення THDU (12–13 % по напрузі при навантаженні) та THDI (45–90 % по струму при навантаженні) унеможливлюють використання стандартних або навіть посилених конденсаторних установок для компенсації реактивної потужності. Згідно з технічними характеристиками, стандартні конденсатори допускають THDU = 2 % і THDI = 20 %, посилені – THDU = 3 % і THDI = 30 %, а конденсатори з антирезонансними дроселями – THDU = 6 %. Перевищення цих рівнів може викликати перевантаження дроселів та конденсаторів, що призведе до їх виходу з ладу та пошкодження іншого обладнання.

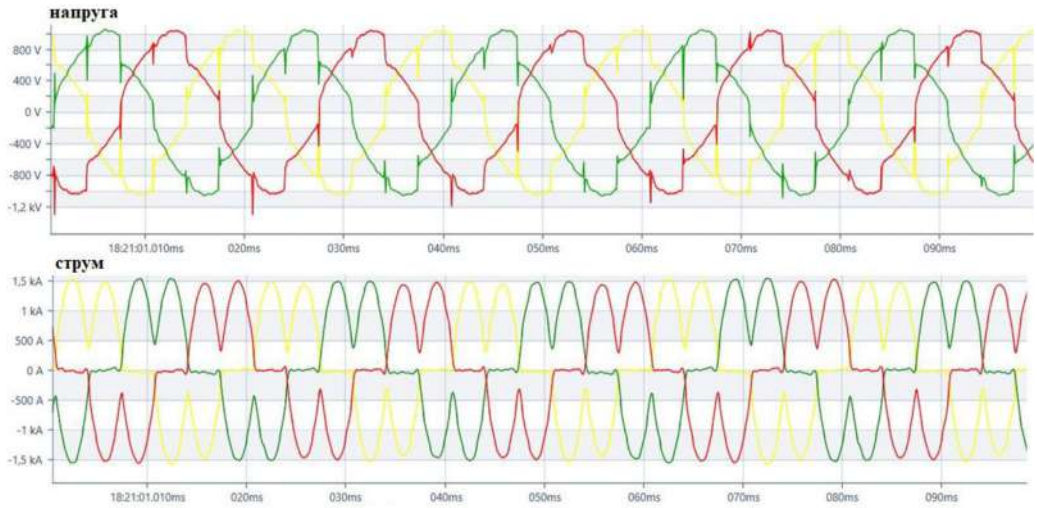


Рис. 5. Осцилограми струму та напруги

Методи фільтрації гармонік зазвичай використовуються для зменшення коефіцієнта гармонічних спотворень струму, а фільтри, засновані на цих методах, класифікуються на три основні категорії: пасивні фільтри, активні фільтри, гібридні фільтри.

Традиційним методом зменшення гармонік є метод пасивної фільтрації. Основний принцип якої полягає в запобіганні протіканню струмів вищих гармонік через енергосистему шляхом. Однак вони мають кілька суттєвих недоліків. Опір системи живлення впливає на характеристики компенсації фільтра.

Основний принцип активного фільтра полягає в точному введенні в систему гармонік напруги/струму з однаковою величиною та протилежним знаком, щоб вони компенсували одна одну, і в лінії електропередач отримують синусоїдну форму напруги/струму. Активні фільтри також менші за фізичними розмірами і, на відміну від традиційних пасивних фільтрів, мають додаткові функції до фільтрації гармонік.

Хоча активні фільтри мають кращі характеристики фільтрації та різноманітність функціональних можливостей, їх застосування зазвичай обмежене кількома МВт рівнями і зазвичай нижче 1 МВт. Для вищих номінальних

потужностей вони зазвичай страждають від високої вартості через великі номінальні значення потужності та експлуатаційні втрати.

Гібридні фільтри поєднують пасивні та активні фільтри в різних конфігураціях, щоб знизити початкову вартість та підвищити ефективність структури фільтра. Основний принцип гібридної фільтрації полягає в тому що пасивна частина налаштовується на компенсацію однієї або декілька найбільших гармонік. Активна частина фільтрує інші вищі гармоніки. Однак функціональність гібридних фільтрів обмежена порівняно з чисто активними фільтрами, і вони вимагають більших інженерних розрахунків та налаштувань.

Вибір фільтрувального рішення для зменшення гармонік залежить переважно від вартості, і призводить до різних типів фільтрів для різних рівнів потужності в кВА. Для прокатного стану, який розглядається, обраний гібридний фільтр. Силова частина гібридного силового активного фільтру (САФ) включає в себе інвертор на базі IGBT транзисторів, що живиться на стороні постійного струму від накопичувальних конденсаторів і вихідний індуктивний фільтр та пасивну частину, налаштованою на 5 та 7 гармоніки. (рис. 6).

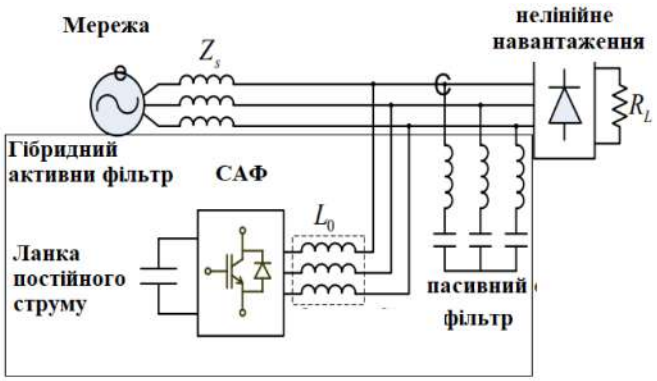


Рис. 6. Силова схема активного фільтру

Активний фільтр може бути встановлений в будь-якій точці розподільної мережі і здатний компенсувати вищі гармоніки від однієї або декількох нелінійних навантажень.

Для ефективної роботи паралельного активного фільтру, його система керування повинна реалізовувати наступні алгоритми:

– *Алгоритм виділення гармонік навантаження*. Основна функція цього алгоритму полягає у вилученні гармонічної інформації з енергосистеми, забрудненої гармоніками, та застосуванні отриманої інформації для формування опорного сигналу струму $i_{саф}$. У цьому аспекті спотворений сигнал струму навантаження $i_н$ обробляється таким чином, що дозволяє розділити його гармонічні елементи $i_{вг}$ та фундаментальні елементи і i_1.

Струм нелінійного навантаження містить основну (i_1) і вищі ($i_{вг}$) гармоніки:

$$i_н = i_1 + i_{вг}, \quad i_{вг} = \sum_{n\geq 2} i_n. \tag{1}$$

Згідно алгоритму струм активного фільтру містить протифазні струму навантаження вищі гармоніки представлені виразом.

$$i_{саф} = -\sum_{n\geq 2} i_n. \tag{2}$$

Якість опорного сигналу струму головним чином визначатиме, наскільки добре працюватиме САФ.

В результаті струм, споживаний від джерела практично синусоїдальний, оскільки містить тільки першу гармоніку:

$$i_{мережа} = i_н + i_{саф} = i_1. \tag{3}$$

– *Алгоритм синхронізації*, функція якого полягає у відстеженні кутового положення сигналу напруги джерела та подальшому генеруванні кута фазової синхронізації для узгодження фази згенерованого i_1 з фазою мережі.

– *Алгоритм регулювання напруги конденсатора постійного кола*. Основна функція якого полягає в оцінці величини струму зарядки постійного кола, необхідного САФ для постійної підтримки напруги постійного кола на бажаному рівні. Цей алгоритм постійно порівнює виміряне значення напруги із заданим значенням та мінімізує результуючу похибку, використовуючи ПІ – регулятор.

– *Алгоритм керування вхідним струмом*. Основна функція полягає у формуванні імпульсів перемикання транзисторів, в даному досліджені використовувати релейне керування для підвищення швидкодії.

Всі ці алгоритми керування пов’язані один з одним та функціонують як загальна система керування. Розроблено систему керування гібридним активним паралельним фільтром та проведено аналіз режимів роботи. В якості

навантаження представлена модель некерованого трифазного випрямляча, яка імітує навантаження прокатного стану.

На рис. 7 представлено результати цифрового моделювання, продемонстрована працездатність САФ та можливість компенсації вищих гармонік, струм споживаний з мережі синусоїдний та має THD меньше 1 % (рис. 8, *б*), при цьому струм навантаження має THD близько 30 % (рис. 8, *а*).

Наведене дослідження з реальними вимірюваннями наочно демонструє масштаб проблеми гармонічних спотворень на промислових підприємствах з потужними нелінійними навантаженнями. Проведений аналіз підкреслює не тільки прямі негативні наслідки високих рівнів гармонік, такі як додаткові втрати та прискорене старіння обладнання, але й опосередковані, як, наприклад, обмеження у виборі та експлуатації засобів компенсації реактивної потужності. Це, в свою чергу, підтверджує актуальність розробки та впровадження ефективних методів та засобів фільтрації гармонік та покращення якості електроенергії в сучасних СЕП.

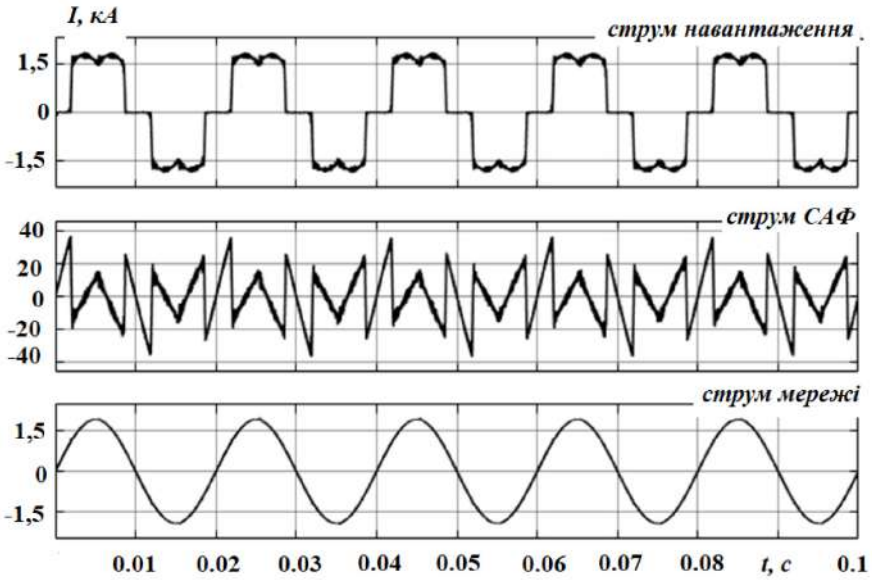


Рис. 7. Результати моделювання

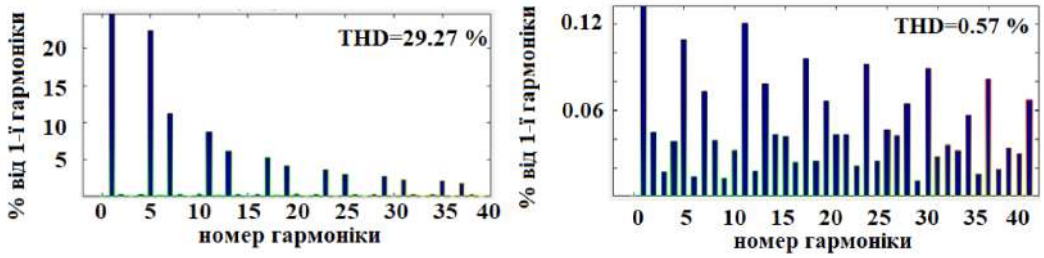


Рис. 8. Спектри струму навантаження (а) та струму мережі (б)

Висновки

Розглянуто проблеми якості електричної енергії в сучасних СЕП, проведені експериментальні дослідження, та за результатами вимірювань та аналізу статистичних даних, значення показників якості електроенергії, зокрема рівень гармонійних складових по струму та напрузі, перевищують гранично допустимі значення згідно ДСТУ EN 50160:2023 та ДСТУ IEC 61000-3-4:2009.

Визначено що високі середні значення THDU (12–13 % по напрузі при навантаженні) та THDI (45–90 % по струму при навантаженні) унеможливлюють використання стандартних або навіть посилених конденсаторних установок для компенсації реактивної потужності. Згідно з технічними характеристиками, стандартні конденсатори допускають THDU = 2 % і THDI = 20 %, посилені – THDU = 3 % і THDI = 30 %, а конденсатори з антирезонансними дроселями – THDU = 6 %. Перевищення цих рівнів може викликати перевантаження дроселів та конденсаторів, що призведе до їх виходу з ладу та пошкодження іншого обладнання.

Запропоновано використання силових активних фільтрів для компенсації реактивної потужності та активної фільтрації гармонік, що дозволить знизити THDI до 1 %.

Список використаної літератури

1. Кузнєцов М. П., Лисенко О. Забезпечення балансу енергії в локальній системі з відновлюваною генерацією. *Відновлювана енергетика*. 2023. №1(72). С. 6–18. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.1(72)6-18

2. Hossain E., Tür M. R., Padmanaban S., Ay S., Khan I. Analysis and Mitigation of Power Quality Issues in Distributed Generation Systems Using Custom Power Devices. *IEEE Access*. 2018., Vol. 6. P. 16816–16833. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2814981

3. Будько В. І. Використання енергії сонячного випромінювання та вітру для зарядження електромобілів Дис. д-ра техн. наук: 05.14.08. НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», ІВЕ НАН України. Київ, 2019. 302 с.

4. Денисюк С. П., Дерев'янко Д. Г. Оцінювання якості електропостачання у локальних системах з джерелами розосередженої генерації: монографія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 166 с.

5. A. Blorfan, P. Wira, D. Flieller, G. Sturtzer and J. Mercklé. A three-phase hybrid active power filter with photovoltaic generation and hysteresis current control. *IECON 2011 – 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Melbourne, VIC, Australia, 2011, pp. 4316–4321, https://doi.org/10.1109/IECON.2011.6120018

6. Ezhiljenekkha G. B., Marsaline Beno M. Review of Power Quality Issues in Solar and Wind Energy. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 24. P. 2137–2143.

7. Lezhniuk P., Hunko I. Local power system as balancing groups. Scientific practice: modern and classical research methods. *V International Scientific and Practical Conference "SCIENTIFIC PRACTICE: MODERN AND CLASSICAL RESEARCH METHODS"* Boston, USA, December 22, 2023. P. 161–163. https://doi.org/10.36074/logos-22.12.2023.044

8. Денисюк С. П., Бєлоха Г. С., Гілевич К. М., Чернещук І. С. Моніторинг ефективності роботи в локальних електроенергетичних системах. *Праці ІЕД НАН України*. 2024. Вип. 69. С. 46–55. https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.046

9. Hernández-Mayoral E., Madrigal-Martínez M., Mina-Antonio J. D., Iracheta-Cortez R., Enríquez-Santiago J. A., Rodríguez-Rivera O., Martínez-Reyes G., Mendoza-Santos E. A Comprehensive Review on Power-Quality Issues, Optimization Techniques, and Control Strategies of Microgrid Based on Renewable Energy Sources. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(12). 9847. https://doi.org/10.3390/su15129847

10. П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько Керування режимами електричних мереж з відновлюваними джерелами енергії за умови їх оптимального секціонування. Вінниця : ВНТУ, 2018. 172 с.

11. Дозоренко О. В. Енергоефективна система електропостачання територіально віддалених споживачів електричної енергії гірничо-збагачувальних комбінатів. Дис. д-ра філософії: 141. Кривий Ріг, 2022

12. Binh, Le & Minh Thuyen, Chau. Three-phase hybrid active power filter: an overview. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2025.,Vol. 15. 1361. https://doi.org/10.11591/ijece.v15i2.pp1361-1371

13. Popescu, M.; Bitoleanu, A.; Suru, C.V.; Linca, M.; Alboteanu, L. Shunt Active Power Filters in Three-Phase, Three-Wire Systems: A Topical Review. *Energies*. 2024, 17, 2867. https://doi.org/10.3390/en17122867

References

1. Kuznetsov M. P., Lysenko O. (2023) Zabezpechennya balansu enerhiyi v lokal'niy systemi z vidnovlyuvanoyu heneratsiyeyu. [Ensuring energy balance in a local system with renewable generation]. *Renewable energy*. Vol. (72). pp. 6–18. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.1(72)6-18. (In Ukrainian).

2. Hossain E., Tür M. R., Padmanaban S., Ay S., Khan I. (2018) Analysis and Mitigation of Power Quality Issues in Distributed Generation Systems Using Custom Power Devices. *IEEE Access*. Vol. 6. pp. 16816–16833. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2814981

3. Budko V. I. (2019) Vykorystannia enerhii soniachnoho vyprominiuvannia ta vitru dlia zariadzhannia elektromobiliv [Using solar radiation and wind energy for charging electric vehicles] (Dr. Tech. Sciences) NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Institute of Electrical and Electronic Engineering of the NAS of Ukraine. Kyiv.

4. Denisyuk S. P., Derevyanko D. G. (2019) Otsiniuvannia yakosti elektropostachannia u lokalnykh systemakh z dzherelamy rozoseredzhenoi heneratsii [Assessment of the quality of electricity supply in local systems with distributed generation sources]: Monograph. Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. 166 c. (In Ukrainian).

5. A. Blorfan, P. Wira, D. Flieller, G. Sturtzer and J. Mercklé, (2011) A three-phase hybrid active power filter with photovoltaic generation and hysteresis current control. *IECON 2011 – 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Melbourne, VIC, Australia. pp. 4316–4321, https://doi.org/10.1109/IECON.2011.6120018

6. Ezhiljenekkha G B, Marsaline Beno M. (2020) Review of Power Quality Issues in Solar and Wind Energy. *Materials Today: Proceedings*. Vol. 24. pp. 2137–2143.

7. Lezhniuk P., Hunko I. (2023) Local power system as balancing groups. Scientific practice: modern and classical research methods. *V International Scientific and Practical Conference "SCIENTIFIC PRACTICE: MODERN AND CLASSICAL RESEARCH METHODS"* Boston, USA. P. 161–163. https://doi.org/10.36074/logos-22.12.2023.044

8. Denisyuk S. P., Bielokha H. S., Gilevich K. M., Cherneschuk I. S. (2024) Monitorynh efektyvnosti roboty v lokalnykh elektroenerhetychnykh systemakh [Monitoring of work efficiency in local electric power systems]. *Pratsi IED NAN Ukrainy*. Vol. 69. pp. 46–55. https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.046 [In Ukrainian].

9. Hernández-Mayoral E., Madrigal-Martínez M., Mina-Antonio J. D., Iracheta- Cortez R., Enríquez-Santiago J. A., Rodríguez-Rivera O., Martínez-Reyes G., Mendoza-Santos E. A (2023) Comprehensive Review on Power-Quality Issues, Optimization Techniques, and Control Strategies of Microgrid Based on Renewable Energy Sources. *Sustainability*. Vol. 15(12). https://doi.org/10.3390/su15129847

10. P. D. Lezhnyuk, O. E. Rubanenko, I. O. Gunko (2018) Keruvannia rezhymamy elektrychnykh merezh z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii za umovy yikh optymalnoho sektsionuvannia [Control of modes of electric networks with renewable energy sources under the condition of their optimal sectioning] Vinnytsia : VNTU. P. 172. (In Ukrainian).

11. Dozorenko O. V. (2022) Enerhoefektyvna systema elektropostachannia terytorialno viddalenykh spozhyvachiv elektrychnoi enerhii hirnycho-zbahachuvalnykh kombinativ [Energy-efficient power supply system for territorially remote consumers of electricity in mining and processing plants] (PhD Thesis), Kryvyi Rih.

12. Binh, Le & Minh Thuyen, Chau. (2025). Three-phase hybrid active power filter: an overview. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. Vol. 15. 1361. https://doi.org/10.11591/ijece.v15i2.pp1361-1371

13. Popescu, M.; Bitoleanu, A.; Suru, C. V.; Linca, M.; Alboteanu, L. (2013) Shunt Active Power Filters in Three-Phase, Three-Wire Systems: A Topical Review. *Energies*. Vol. 17. 2867. https://doi.org/10.3390/en17122867

Дата першого надходження рукопису до видання: 19.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 543.422.3:537.8:637.344 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.6

Д. О. ВАСИЛЕНКО
аспірант
Державний біотехнологічний університет
ORCID: 0009-0000-2604-1087

М. С. СОРОКІН
кандидат технічних наук, доцент
Державний біотехнологічний університет
ORCID: 0000-0002-7524-7687

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ НА ТОЧНІСТЬ ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО АНАЛІЗУ БІЛКІВ У СИРНИХ ПРОДУКТАХ

Метою цієї роботи є визначення ефективності та придатності основних електротехнічних методів спектрального аналізу (NIR, FTIR/MIR, UV–Vis, флуоресцентна і раманівська спектроскопія, діелектрична спектроскопія та гіперспектральне зображення) для автоматизованого контролю якості молочної продукції з урахуванням впливу електромагнітних завад на відтворюваність флуоресцентного сигналу білків у сирних матрицях.

У процесі дослідження проведено комплексний аналіз літературних даних та теоретичних моделей взаємодії зовнішніх електромагнітних полів із флуорофорами білків, класифіковано основні джерела завад у виробничому середовищі згідно з ISO/IEC 17025. Розроблено багатокритеріальну матрицю методики оцінювання за чотирма основними категоріями (точність, швидкодія, надійність, інтеграція) із застосуванням MCDA. Для верифікації запропонованих критеріїв рекомендовано пілотне тестування inline-систем на виробничій лінії, адаптивні режими калібрації моделей та моніторинг KPI із застосуванням процедур k-fold cross-validation і міжлабораторних випробувань.

Теоретичний аналіз показав, що зовнішні електромагнітні завади здатні знижувати інтенсивність флуоресценції на 5–15 % залежно від частоти та потужності поля, що призводить до зростання RMSE і зміщення bias. Класифікація виявила низькочастотні та високочастотні (RF, мікрохвилі, імпульсні інвертори) джерела шумів. Багатокритеріальна матриця для прикладного сценарію показала, що NIR-спектроскопія з високою швидкодією та помірною точністю отримує зважену оцінку 4,4, тоді як флуоресцентна спектроскопія з найвищою чутливістю – 4,0.

Розроблена MCDA-матриця дозволяє обрати оптимальний метод залежно від виробничих пріоритетів: пріоритет швидкодії – NIR, пріоритет точності – флуоресцентна спектроскопія або FTIR/MIR. Практичні рекомендації щодо пілотного тестування, адаптивної калібрувальної стратегії та моніторингу KPI забезпечують підґрунтя для інтеграції спектральних систем в інтелектуальні лінії контролю відповідно до вимог ISO/IEC 17025.

Ключові слова: *спектральний аналіз, гіперспектральне зображення, інфрачервона спектроскопія, MCDA, інтелектуальні системи контролю, діелектрична спектроскопія.*

D. O. VASYLENKO
Postgraduate Student
State Biotechnological University
ORCID: 0009-0000-2604-1087

M. S. SOROKIN
PhD in Technical Sciences, Associate Professor
State Biotechnological University
ORCID: 0000-0002-7524-7687

INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC FIELDS ON THE ACCURACY OF PROTEIN FLUORESCENCE ANALYSIS IN CHEESE PRODUCTS

The aim of this work is to determine the effectiveness and suitability of the main electrical engineering methods of spectral analysis (NIR, FTIR/MIR, UV–Vis, fluorescence and Raman spectroscopy, dielectric spectroscopy, and hyperspectral imaging) for automated quality control of dairy products, taking into account the influence of electromagnetic interference on the reproducibility of the fluorescent signal of proteins in cheese matrices.

During the study, a comprehensive analysis of literature data and theoretical models of the interaction of external electromagnetic fields with protein fluorophores was carried out, and the main sources of interference in the production

© Василенко Д. О., Сорокін М. С., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

environment were classified in accordance with ISO/IEC 17025. A multi-criteria matrix for evaluating methods in four main categories (accuracy, speed, reliability, integration) was developed using MCDA. To verify the proposed criteria, it is recommended to conduct pilot testing of inline systems on the production line, adaptive model calibration modes, and KPI monitoring using k-fold cross-validation and interlaboratory testing procedures.

Theoretical analysis showed that external electromagnetic interference can reduce fluorescence intensity by 5–15 % depending on the frequency and power of the field, leading to an increase in RMSE and bias offset. Classification revealed low-frequency and high-frequency (RF, microwaves, pulse inverters) noise sources. A multi-criteria matrix for the application scenario showed that NIR spectroscopy with high speed and moderate accuracy receives a weighted score of 4.4, while fluorescence spectroscopy with the highest sensitivity receives a score of 4.0.

The developed MCDA matrix allows you to choose the optimal method depending on production priorities: priority of speed – NIR, priority of accuracy – fluorescence spectroscopy or FTIR/MIR. Practical recommendations for pilot testing, adaptive calibration strategy, and KPI monitoring provide the basis for integrating spectral systems into intelligent control lines in accordance with ISO/IEC 17025 requirements.

Key words: *spectral analysis, hyperspectral imaging, infrared spectroscopy, MCDA, intelligent control systems, dielectric spectroscopy.*

Постановка проблеми

Спектральні методи, такі як флуоресценція, інфрачервона (ІЧ) та спектральний аналіз методом Рамана, відкривають широкі можливості для селективного та неінвазивного контролю якості молочних продуктів. Вони дозволяють виявляти навіть незначні зміни у складі сировини, не порушуючи її структури. Проте в умовах виробництва, де присутнє змінне промислове електромагнітне поле, флуоресцентні сигнали білків можуть зазнавати суттєвих спотворень. Це знижує відтворюваність результатів, навіть коли використовуються сучасні алгоритми машинного навчання для обробки даних. У цьому контексті однією з основних проблем є відсутність уніфікованих критеріїв для оцінювання впливу електромагнітних завад. Це унеможливлює об'єктивне порівняння різних методик за точністю, швидкодією та надійністю. Окрім того, нестача єдиної структурованої матриці параметрів ускладнює інтеграцію багаторівневих спектральних даних у системи контролю в реальному часі. Як наслідок, виникають розбіжності між високоточними лабораторними дослідженнями та практичними потребами виробництва, де стабільність і передбачуваність результатів є надзвичайно важливими.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У сучасній науковій літературі широко представлено дослідження, присвячені синтезу функціональних похідних тієно[2,3-d]піримідинів, спектроскопічним і біоімпедансним методам аналізу молока та молочних продуктів, а також використанню хемометричних алгоритмів і методів машинного навчання для підвищення точності контролю їхнього складу та якості. Зокрема, Г. Різак описує синтез, фізико-хімічні та біологічні властивості 2,4-діоксо-й 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5-R-6-R′-тієно[2,3-d]піримідинів, включно з їхньою ізоляцією, очищенням, фармакологічним аналізом і вдосконаленням методів синтезу [1]. В іншій роботі Г. Різак та співавтори досліджують синтез 2-ацилокси-4-оксо(іміно)-3-феніл-5-R-6-R′-тієно[2,3-d]піримідинів і β-(2,4-діоксо-3-феніл-5-R-6-R′-тієно[2,3-d] піримідин-1-іл)пропіонових амідоксидів, а також їхні фізико-хімічні й антимікробні властивості [2]. Сканувальну конфокальну раманівську мікроскопію з мультиваріантним аналізом для візуалізації мікроструктури молока та розподілу його основних компонентів – жиру, білка та лактози – в об'ємних зрізах використовують А. Суркова та колеги (A. Surkova et al.) [3]. Огляд застосування ІЧ-спектроскопії для неінвазивного аналізу автентичності та якості молочних продуктів, зокрема в контексті контролю складу, процесів дозрівання сиру та виявлення контамінантів представляють С. Перейра та співавтори (S. Pereira et al.) [4]. Чотирьохелектродний біоімпедансний сенсор, заснований на методі ван дер Пау, для виявлення доданої води в молоці через аналіз спектра імпедансу в діапазоні 10 Гц – 5 МГц пропонують М. Ашурірад і (M. Ashoorirad) і Р. Багбані (R. Baghbani) [5]. Можливості ІЧ-спектроскопії у виявленні та кількісному визначенні домішок у молоці – від розведення водою до залишків ветеринарних препаратів – аналізують С. Ченіті та колеги (C. Ceniti et al.), акцентуючи на можливостях швидкого скринінгу [6]. Програмне забезпечення MCDA-MSS, що дозволяє таксономічно підбирати оптимальні методи багатокритеріального аналізу з-понад 200 доступних залежно від параметрів конкретного завдання розробили М. Чінеллі та співавтори (M. Cinelli et al.) [7]. Дані щодо застосування NIR- та MIR-спектроскопії для визначення хімічного складу та автентичності молочних продуктів узагальнюють М. Де Маркі та колеги (M. De Marchi et al.). Науковці надають практичні рекомендації для їх упровадження в промисловість [8]. На відновлення наукового інтересу до УФ–ВІС-спектроскопії завдяки сучасним підходам хемометрії вказують Р. Ріос-Рейна та співавтори (R. Ríos-Reina et al.), аналізуючи підходи до препроцесингу, відбору змінних і багатовимірного калібрування [9]. Новий підхід до фокусування ліпосом за допомогою акустичних воронок із топологічними зарядами для цільового вивільнення ліків шляхом локального нагрівання, що відкриває перспективи в таргетній терапії, пропонують Л. Ду та колектив однодумців (L. Du et al.) [10]. Спектри синхронної фронтальної флуоресценції молока систематизують П. Фрейре та співавтори (P. Freire et al.), пов'язуючи спектральні області з характерними флуорофорами й узагальнюючи дані для потреб онлайн-моніторингу якості [11]. In-line NIR-спектроскопію разом з алгоритмами

машинного навчання для прогнозування концентрацій метаболітів у крові корів застосовують Д. Джаннудзі та колеги (D. Giannuzzi et al.) [12]. Ефективність MIR-спектроскопії на прикладі 1736 проб буйволячого молока для прогнозування параметрів коагуляції, тверднення та механічної міцності оцінили А. Герра та співавтори (A. Guerra et al.), проте отримана модель (R^2 = 0,57) виявилася недостатньо ефективною для практичного застосування [13]. Метод AHP для визначення вагових коефіцієнтів критеріїв соціальної оцінки життєвого циклу мобільних сервісів, спираючись на дані опитування 48 експертів, використовують Й. Геттеріх та колектив однодумців (J. Hetterich et al.). Результати засвідчили загальну узгодженість при наявності деяких групових розбіжностей [14]. Гіперспектральну зйомку з безпілотників з алгоритмами RF, MLR, DNN та SVM для оцінювання надземної біомаси молочної вики поєднують Х. Ху та колеги (H. Hu et al.), при цьому модель RF продемонструвала високу точність (R^2 = 0,95, RRMSE = 14,86 %) [15].

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є всебічне оцінювання електротехнічних методів спектрального аналізу для автоматизованого контролю якості молочної продукції та розробка системи критеріїв для об'єктивного порівняння їхньої точності, швидкодії, надійності й інтеграційної здатності в інтелектуальні системи.

Завдання дослідження:

1) проаналізувати сучасні електротехнічні методи спектрального аналізу, що застосовуються для автоматизованого контролю якості молочної продукції;

2) визначити підходи до оцінювання ефективності та придатності зазначених методів;

3) розробити матрицю критеріїв точності, швидкодії, надійності та інтеграції методів в інтелектуальні системи контролю.

Викладення основного матеріалу дослідження

Спектральні методи стали невіддільною частиною онлайн-контролю якості молочної продукції завдяки неінвазивності та швидкості. Зокрема, NIR і MIR-спектроскопії дають швидку кількісну оцінку білків, жирів і вологи без пробопідготовки [4, с. 1; 8, с. 2]; UV–Vis та синхронна фронт-фейс флуоресценція виявляють характерні флюорофори [9, с. 1]; раманівська гіперспектральна візуалізація картографує мікроструктуру молока й сиру [3, с. 1]; електрична імпеданс-спектроскопія оцінює діелектричні властивості й фіксує зміни в спектрі [4, с. 2; 8, с. 10590].

Ближня інфрачервона спектроскопія (780–2500 нм) аналізує поглинання води, білків, жирів і вуглеводів, даючи кількісні результати за кілька секунд і легко інтегрується у виробничі лінії для безперервного моніторингу [4, с. 1; 8, с. 2]. FTIR/MIR (2500–25 000 нм) фіксує коливальні переходи через Фур'є-перетворення, даючи «відбиток» амідних і карбонільних груп; висока селективність дозволяє точно виявляти домішки в молоці й сирі [6, с. 6; 8, с. 4]. UV–Vis (200–800 нм) аналізує поглинання білкових хромофорів та природних пігментів; проста оптична схема й невисока вартість роблять його популярним сенсором для попереднього оцінювання складу молока [9, с. 2]. Флуоресцентна спектроскопія (UV-збудження) реєструє front-face чи синхронні спектри білків, виявляючи казеїн і фальсифікації з чутливістю до ppm [11, с. 3]. Раманівська спектроскопія фіксує зсув частоти при розсіянні світла, картографуючи мікроструктуру без контакту зі зразком [3, с. 4]. Діелектрична спектроскопія (Гц–МГц) вимірює активну й реактивну складову імпедансу, що відображає зміни в структурі води, білків і жиру; швидко виявляє фальсифікації та контролює дозрівання сиру [5, с. 2]. Гіперспектральне зображення поєднує спектроскопію з візуальною зйомкою, отримуючи для кожного пікселя повний спектр у сотнях смуг для виявлення неоднорідностей і контамінацій.

Попри надзвичайну чутливість флуоресцентної спектроскопії, в умовах виробництва зовнішні електромагнітні поля можуть знижувати точність і повторюваність вимірювань. Це обґрунтовує необхідність детального аналізу механізмів взаємодії електромагнітного поля з флуоресцентними характеристиками білків.

Механізм флуоресценції полягає в тому, що молекула-флуорофор поглинає високоенергійний фотон, переходить у збуджений стан і випромінює фотон меншої енергії (стоксовий зсув). Інтенсивність і спектр сигналу, відповідно до діаграми Яблонського, змінюються під впливом температури, pH, полярності розчинника та ефекту квенчінгу [11, с. 3].

Проте, у присутності електромагнітних полів спостерігається взаємодія з дипольними моментами флуорофорів, що призводить до депопуляції збудженого стану, зниження інтенсивності, скорочення часу життя та зсуву максимуму емісії – особливо це виражено в складних матрицях, зокрема сирі.

Джерела електромагнітних завад на виробництві можна класифікувати на:

1) низькочастотні (50/60 Гц) – трансформатори, лінії електропередач;

2) високочастотні (RF/мікрохвилі) – бездротові системи, RF-підігрів, радари;

3) імпульсні – інверторні приводи, зварювальні апарати, індукційні нагрівачі;

4) статичні – постійні магніти відокремлювачів [16].

Основною проблемою більшості попередніх досліджень є відсутність контрольованих експериментів, у яких варіюються частоти й інтенсивності полів, а також бракує комплексного фронт-фейс моніторингу з поперемінним екрануванням і заземленням сенсорів для визначення порогових рівнів і виробничих рекомендацій.

Спираючись на теоретичні засади впливу електромагнітних полів на флуоресценцію білків [11, с. 3] і класифікацію джерел завад [16], було здійснено систематичну оцінку точності, робастності та інтегрованості спектральних методів. Точність оцінюється за показниками RMSE, R^2 і bias. Саме bias виявляється критичним за наявності шумів, адже навіть незначне спотворення інтенсивності спричиняє систематичні похибки та зниження R^2, що суперечить вимогам ISO/IEC 17025. У inline-NIR аналізі молока моделі машинного навчання знижують RMSE на 3–6 % і забезпечують кореляційний коефіцієнт r приблизно 0.55–0.66, що відповідає значенням R^2 у межах 0.30–0.44 навіть за наявності шумів. Методи front-face флуоресценції для кейсин-моделей забезпечують RMSEP на рівні 0.12–0.13 % та RPD 3.2–3.4 навіть у змінному електромагнітному середовищі. Швидкодія inline-NIR систем становить 2–5 с на зразок, проте в умовах високого рівня шумів застосовують усереднення кількох послідовних сканів для стабілізації сигналу. UV–Vis спектрофотометрія теоретично дає спектри за менш ніж 1 с, але через вимоги до звуження смуги й підвищеної чутливості час аналізу збільшився до 5–10 с. Inline-аналізатори AfiLab зчитують спектри молока двічі на добу для кожної корови, що забезпечує близько 770 зразків на добу на лінію доїння, і для підтримки такої продуктивності використовують адаптивне усереднення шумів та періодичне автоматичне калібрування. Надійність спектральних методів оцінюють за коефіцієнтом варіації (CV) та дрейфом сигналу протягом тривалих серій вимірювань. Для кількісних визначень білків CV не повинен перевищувати 2–3 %, а дрейф за годину роботи має бути меншим за 1 % від початкової інтенсивності.

Калібрування моделей спектрального аналізу передбачає побудову регресій PLS, MPLS, kernel-PLS та penalized regression із періодичною переоцінкою на нових зразках. Використання стратегій K-fold крос-валідації (5–10 фолд) і leave-one-batch-out дозволяє оцінити узагальнювальну здатність без упередження, а міжлабораторна валідація за ISO/IEC 17025 сприяє відтворюваності й зменшенню дисперсії між джерелами даних. Уніфікована матриця критеріїв передбачає комбінування кількісних і якісних показників із призначенням ваг за допомогою MCDA для ранжування спектральних методів відповідно до виробничих завдань, і цей підхід підтверджується оглядом інфрачервоної спектроскопії для контролю якості молочних продуктів. Основні категорії MCDA-MSS охоплюють точність із показниками RMSE, R^2 і bias, швидкодію за часом аналізу зразка й кількістю оброблених зразків, надійність за CV і drift, а також інтеграцію за сумісністю зі стандартними інтерфейсами обміну даними та затримкою передавання. Виробничі та регуляторні вимоги зосереджуються на компетенції персоналу, ресурсному забезпеченні, валідації методів і трасованості результатів відповідно до стандарту ISO/IEC 17025. Підкритерії для матриці містять порогові значення RMSE ≤ 1 % і $R^2 \geq 0.9$ для IR-методів, аналіз часу проби з урахуванням IEM-перешкод, а також контроль CV ≤ 3 % за 100 послідовних сканів та drift ≤ 1 % при зміні поля. Вагові коефіцієнти, визначені за допомогою AHP, дозволяють відобразити пріоритети виробництва, зокрема, у стандартному сценарії швидкодія може отримувати вагу 0.4, точність 0.3, надійність 0.2 та інтеграція 0.1, тоді як для преміальних продуктів точність підвищується до 0.5, а швидкодія знижується до 0.2 з відповідною корекцією інших показників.

Для побудови багатокритеріальної матриці (MCDA) кожний із розглянутих спектральних методів відображається в окремому рядку, а критерії точності, швидкодії, надійності та інтеграції з їх вагами – у стовпцях. У клітинки заносяться бали методів за кожним критерієм за обраною шкалою (наприклад, 1–5), а зважена сума (Weighted Score) обчислюється як $\sum$(бал × вага). Наведені оцінки в таблиці 1 є ілюстративними; реальні значення визначаються експериментально згідно з процедурою валідації й кодування MCDA. Такий підхід дозволяє прозоро порівняти й ранжувати методики відповідно до виробничих пріоритетів [7, с. 7].

Таблиця 1

Коефіцієнти для побудови багатокритеріальної матриці

Метод	Точність (0.3)	Швидкодія (0.4)	Надійність (0.2)	Інтеграція (0.1)	Зважена оцінка
NIR	4	5	4	4	4.4
FTIR/MIR	5	3	5	3	4.2
UV–Vis	3	4	3	5	3.8
Флуоресценція	5	3	4	3	4.0
Раманівська	4	2	5	2	3.5
Імпедансна	3	4	4	4	3.8
Гіперспектральне	5	2	4	3	3.9

Джерело: побудовано автором на основі [17–24]

Аналіз чутливості є важливим етапом у процесі обґрунтування вибору оптимальної спектральної методики, оскільки дозволяє оцінити, як зміна вагових коефіцієнтів впливає на підсумковий рейтинг технологій. Зокрема, шляхом поступової варіації ваг (наприклад, збільшення ваги критерію точності з 0,3 до 0,5) можна простежити, як трансформується загальна зважена оцінка кожного методу. Такий підхід допомагає визначити стабільність обраного рішення за змінних виробничих умов і критичність окремих характеристик, зокрема точності, відносно швидкодії чи здатності до інтеграції [14, с. 31–32].

Після аналітичного обґрунтування вибору технології доцільно переходити до пілотного тестування обраного методу (наприклад, inline-NIR) безпосередньо на виробничій лінії з переробки молока. На цьому етапі використовують обмежену партію зразків, відібраних із різних стадій технологічного процесу. Оптимально, щоб тестування тривало щонайменше один виробничий цикл (кілька діб), аби охопити варіативність умов, таких як температура, склад сировини або рівень фонових шумів, а також перевірити стабільність функціонування системи збору даних у режимі реального часу. Як стверджують науковці, одного тижня in-line тестування достатньо для налаштування моделей калібрування і виявлення джерел систематичних відхилень. При цьому дотримання вимог ISO/IEC 17025 гарантує достовірність отриманих результатів і створює підґрунтя для подальшої масштабованої валідації [16].

Під час розгортання системи важливу роль відіграють оптимальні режими калібрування, які мають охоплювати початкову побудову моделей на репрезентативній вибірці зразків із різним вмістом білків, жирів і вологи, а також регулярне оновлення моделей із залученням нових контрольних зразків. Згідно з рекомендаціями вчених, ефективними є адаптивні стратегії обробки гіперспектральних даних, зокрема PCA-фільтрація та PLS-регресія з регуляризацією, з перенавчанням моделей щоквартально або за зміни технологічного режиму [18, с. 1]. Водночас дослідники підкреслюють значущість таких факторів, як системна валідація методик, трасованість калібрувальних зразків і якісна документація процедур, що забезпечує відповідність вимогам стандартів і знижує ризик дрейфу моделей у часі [19, с. 17].

Після впровадження системи доцільно встановити набір основних показників ефективності (KPI) для регулярного моніторингу її роботи. До таких показників належать середньоквадратична похибка (RMSE), частота повторних калібрувань, кількість простоїв через перевищення рівня шумів та відсоток невдалих вимірювань. За даними досліджень, дворазове щоденне зчитування спектрів молока дозволяє зафіксувати кілька сотень результатів щодня, на підставі яких можна будувати статистику KPI та відстежувати тренди зміни алгоритмічних похибок [12, с. 9–10]. При перевищенні заданих порогів KPI мають автоматично запускатися адаптивні процедури корекції – повторне калібрування або сповіщення технолога для ручної верифікації [19, с. 17].

Аналіз підтвердив, що електромагнітні завади можуть суттєво знижувати інтенсивність і стабільність флуоресцентного сигналу білків, що призводить до росту RMSE і bias, а також до збільшення часу повторних вимірювань. Водночас комбіноване застосування NIR, FTIR, UV-Vis, флуоресценції та спектроскопічний аналіз розсіяння Рамана з урахуванням адекватного екранування та алгоритмічного фільтрування шумів демонструє можливість досягнення високих значень R^2 (>0,9) та прийнятних throughput навіть в умовах змінюваного електромагнітного фону.

У цьому контексті наявні inline-системи спектрального аналізу вже забезпечують достатню швидкодію (кілька секунд на зразок) та інтеграцію з лініями доїння чи фасування, хоча й потребують жорсткого контролю калібрування й періодичного оновлення моделей. Запропоновані процедури пілотного тестування, адаптивної калібрувальної стратегії та моніторингу KPI дозволяють мінімізувати ризики невідповідностей і забезпечити відповідність стандартам ISO/IEC 17025, що робить такі технології готовими до широкого застосування.

З огляду на це, необхідно провести систематичні досліди з варіацією частоти й інтенсивності зовнішніх полів на флуоресцентний відгук у сирних матрицях, визначити порогові рівні впливу та відпрацювати алгоритмічні стратегії компенсації шумів. Крім того, доцільно розширити MCDA-матрицю, включивши економічні та енергетичні показники, і випробувати результати на різних типах сирів та в різних виробничих умовах для побудови універсальних рекомендацій.

Висновки

Проведений аналіз сучасних електротехнічних методів спектрального аналізу – NIR, FTIR/MIR, UV–Vis, флуоресцентна та раманівська спектроскопії, імпедансна спектроскопія й гіперспектральне зображення – підтвердив їхню високу потенційну придатність для автоматизованого контролю якості молочних продуктів, проте вказав на необхідність розроблення уніфікованої системи критеріїв оцінювання точності, швидкодії, надійності й інтеграції.

Теоретичні дослідження та класифікація джерел електромагнітних завад засвідчили, що змінні поля можуть істотно впливати на інтенсивність і стабільність флуоресцентного сигналу білків, що актуалізує потребу у визначенні порогових рівнів впливу та впровадженні алгоритмічних стратегій компенсації шумів з метою забезпечення відтворюваності результатів.

Запропонована багатокритеріальна матриця (MCDA) із вагами для кожного критерію дозволяє прозоро порівняти спектральні методики та обирати оптимальний інструмент залежно від виробничих пріоритетів – від високої продуктивності до преміальної якості продукції.

Практичні рекомендації з пілотного тестування, калібрування, моніторингу KPI та адаптивного оновлення моделей створюють фундамент для успішної інтеграції спектральних систем в інтелектуальні лінії контролю відповідно до стандарту ISO/IEC 17025.

Подальші дослідження мають зосередитися на систематичних експериментах із варіюванням параметрів електромагнітного впливу в сирних матрицях, розширенні MCDA-матриці економічними показниками та застосуванні розроблених підходів на різних типах сирів і виробничих майданчиках для формування універсальних практичних рекомендацій.

Список використаної літератури

1. Різак Г. В. Синтез, фізико-хімічні та біологічні властивості 2,4-діоксо- та 4-іміно-2-оксо-3-феніл-5-R-6-R′-тієно[2,3-d]піримідинів: монографія. Київ, 2016. URL: https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/52778 (дата звернення: 06.06.2025).

2. Різак Г. В., Шемчук Л. А., Левашов Д. В., Євсюкова В. Ю., Криськів О. С. Синтез 2-ацилокси-4-оксо(іміно)-3-феніл-5-R-6-R′-тієно[2,3-d]піримідинів та амідоксидів β-(2,4-діоксо-3-феніл-5-R-6-R′-тієно[2,3-d] піримідин-1-іл) пропіонових кислот та їх антимікробна активність. *Вісник фармації*. 2011. Т. 68. № 4. С. 39–41. URL: https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/52761 (дата звернення: 06.06.2025).

3. Surkova A., Bogomolov A. Analysis of milk microstructure using Raman hyperspectral imaging. *Molecules*. 2023. Vol. 28. № 6. Article 2770. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules28062770

4. Pereira C. G., Luiz L. C., Bell M. J. V., Anjos V. Near and mid infrared spectroscopy to assess milk products quality: A review of recent applications. *Dairy Research and Technology*. 2020. Vol. 10. Article 14. DOI: https://doi.org/10.24966/DRT-9315/100014

5. Ashoorirad M., Baghbani R., Ghalamboran M. R. Bioimpedance sensor to detect water content in milk based on van der Pauw method. *IET Nanobiotechnology*. 2021. Vol. 15. № 1. С. 611–618. DOI: https://doi.org/10.1049/nbt2.12056

6. Ceniti C., Spina A. A., Piras C., Oppedisano F., Tilocca B., Roncada P., Britti D., Morittu V. M. Recent advances in the determination of milk adulterants and contaminants by mid-infrared spectroscopy. *Foods*. 2023. Vol. 12. № 15. Article 2917. DOI: https://doi.org/10.3390/foods12152917

7. Cinelli M., Kadziński M., Miebs G., Gonzalez M., Słowiński R. Recommending multiple criteria decision analysis methods with a new taxonomy-based decision support system. arXiv. 2021. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.07378

8. De Marchi M., Penasa M., Zidi A., Manuelian C. L. Invited review: Use of infrared technologies for the assessment of dairy products – Applications and perspectives. *Journal of Dairy Science*. 2018. Vol. 101. № 12. С. 10589–10604. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2018-15202

9. Ríos-Reina R., Azcarate S. M. How Chemometrics Revives the UV–Vis Spectroscopy Applications as an Analytical Sensor for Spectralprint (nontargeted) Analysis. *Chemosensors*. 2023. Vol. 11. № 1. Article 8. DOI: https://doi.org/10.3390/chemosensors11010008

10. Du L., Hu G., Hu Y., Wang Q. Acoustic Forceps Based on Focused Acoustic Vortices with Different Topological Charges. *Sensors*. 2023. Vol. 23. № 15. Article 6874. DOI: https://doi.org/10.3390/s23156874

11. Freire P., Zamora A., Castillo M. Synchronous front-face fluorescence spectra: A review of milk fluorophores. *Foods*. 2024. Vol. 13. № 5. Article 812. DOI: https://doi.org/10.3390/foods13050812

12. In-line near-infrared analysis of milk coupled with machine learning methods for the daily prediction of blood metabolic profile in dairy cattle / Giannuzzi D. et al. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Article 8058. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-022-11799-0

13. Guerra A., Boselli C., Galli T., Ciofi L., Fichi G., De Marchi M., Manuelian C. L. Low effectiveness of mid-infrared spectroscopy prediction models of Mediterranean Italian buffalo bulk milk coagulation traits. *Foods*. 2024. Vol. 13. № 13. Article 1957. DOI: https://doi.org/10.3390/foods13131957

14. Hetterich J. Using analytical hierarchy process (AHP) to introduce weights to social life cycle assessment of mobility services. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. № 3. Article 1258. DOI: https://doi.org/10.3390/su13031258

15. Hu H., Zhou H., Cao K., Lou W., Zhang G., Gu Q., Wang J. Biomass estimation of milk vetch using UAV hyperspectral imagery and machine learning. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. № 12. Article 2183. DOI: https://doi.org/10.3390/rs16122183

16. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. *ISO: website*. 2017. URL: https://www.iso.org/standard/66912.html (date of access: 06.01.2025).

17. Khristoforova Y., Bratchenko L., Bratchenko I. Combination of Raman spectroscopy and chemometrics: A review of recent studies published in the Spectrochimica Acta, Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy Journal. *arXiv*. 2022. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.10051

18. Medina-García M., Amigo J. M., Martínez-Domingo M. A., Valero E. M., Jiménez-Carvelo A. M. Strategies for analysing hyperspectral imaging data for food quality and safety issues – A critical review of the last 5 years. *Microchemical Journal*. 2025. Vol. 214. Article 113994. DOI: https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.113994

19. Panagiotidou E., Chountalas P. T., Magoutas A. I., Kotsopoulos T. A. Systematic identification and validation of critical success factors for ISO/IEC 17025 implementation. *Administrative Sciences*. 2025. Vol. 15. № 2. Article 60. DOI: https://doi.org/10.3390/admsci15020060

20. Scandurra G., Cardillo E., Ciofi C., Ferro L. UHT milk characterization by electrical impedance spectroscopy. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. № 15. Article 7559. DOI: https://doi.org/10.3390/app12157559

21. Ma Y. B., Amamcharla J. K. A rapid method to quantify casein in fluid milk by front-face fluorescence spectroscopy combined with chemometrics. *Journal of Dairy Science*. 2021. Vol. 104. № 1. С. 243–252. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2020-18799

22. Zhang H., Wisuthiphaet N., Cui H., Nitin N., Liu X., Zhao Q. Spectroscopy approaches for food safety applications: Improving data efficiency using active learning and semi-supervised learning. *arXiv*. 2021. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.03765

23. Zhang Z.-Y., Su J.-S., Xiong H.-M. Technology for the quantitative identification of dairy products based on Raman spectroscopy, chemometrics, and machine learning. *Molecules*. 2025. Vol. 30. № 2. Article 239. DOI: https://doi.org/10.3390/molecules30020239

References

1. Rizak H. V. (2016) Syntez, fizyko-khimichni ta biolohichni vlastyvosti 2,4-diokso- ta 4-imino-2-okso-3-fenil-5-R-6-R′-tiieno[2,3-d]pirymidyniv: monohrafiia [Synthesis, physicochemical and biological properties of 2,4-dioxo- and 4-imino-2-oxo-3-phenyl-5-R-6-R′-thieno[2,3-d]pyrimidines: monograph]. Kyiv. Retrieved from https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/52778 [in Ukrainian].

2. Rizak H. V., Shemchuk L. A., Levashov D. V., Yevsiukova V. Yu., Kryskiv O. S. (2016) Syntez 2-atsyloksy-4-okso(imino)-3-fenil-5-R-6-R′-tiieno[2,3-d]pirymidyniv ta amidoksydiv β-(2,4-diokso-3-fenil-5-R-6-R′-tiieno[2,3-d] pirymidyn-1-il) propionovykh kyslot ta yikh antymikrobna aktyvnist [Synthesis of 2-acyloxy-4-oxo(imino)-3-phenyl-5-R-6-R′-thieno[2,3-d]pyrimidines and amidoxides of β-(2,4-dioxo-3-phenyl-5-R-6-R′-thieno[2,3-d]pyrimidin-1-yl)propionic acids and their antimicrobial activity]. *Visnyk farmatsii*, vol. 68, no. 4, pp. 39–41. Retrieved from https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/52761

3. Surkova A., & Bogomolov A. (2023) Analysis of milk microstructure using Raman hyperspectral imaging. *Molecules*, vol. 28, no. 6, 2770. https://doi.org/10.3390/molecules28062770

4. Pereira C. G., Luiz L. C., Bell M. J. V., & Anjos V. (2020) Near and mid infrared spectroscopy to assess milk products quality: A review of recent applications. *Dairy Research and Technology*, no. 10, 14. https://doi.org/10.24966/DRT-9315/100014

5. Ashoorirad M., Baghbani R., & Ghalamboran M. R. (2021) Bioimpedance sensor to detect water content in milk based on van der Pauw method. *IET Nanobiotechnology*, vol. 15, no. 1, pp. 611–618. https://doi.org/10.1049/nbt2.12056

6. Ceniti C., Spina A. A., Piras C., Oppedisano F., Tilocca B., Roncada P., Britti D., & Morittu V. M. (2023) Recent advances in the determination of milk adulterants and contaminants by mid-infrared spectroscopy. *Foods*, vol. 12, no. 15, 2917. https://doi.org/10.3390/foods12152917

7. Cinelli M., Kadziński M., Miebs G., Gonzalez M., Słowiński R. (2021). Recommending multiple criteria decision analysis methods with a new taxonomy-based decision support system. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.07378

8. De Marchi M., Penasa M., Zidi A., & Manuelian C. L. (2018) Invited review: Use of infrared technologies for the assessment of dairy products – Applications and perspectives. *Journal of Dairy Science*, vol. 101, no. 12, pp. 10589–10604. https://doi.org/10.3168/jds.2018-15202

9. Ríos-Reina R., & Azcarate S. M. (2023) How chemometrics revives the UV–Vis spectroscopy applications as an analytical sensor for spectralprint (nontargeted) analysis. *Chemosensors*, vol. 11, no. 1, 8. https://doi.org/10.3390/chemosensors11010008

10. Du L., Hu G., Hu Y., & Wang Q. (2023) Acoustic forceps based on focused acoustic vortices with different topological charges. *Sensors*, vol. 23, no. 15, 6874. https://doi.org/10.3390/s23156874

11. Freire P., Zamora A., & Castillo M. (2024) Synchronous front-face fluorescence spectra: A review of milk fluorophores. *Foods*, vol. 13, no. 5, 812. https://doi.org/10.3390/foods13050812

12. Giannuzzi D., Mota L. F. M., Pegolo S., Gallo L., Schiavon S., Tagliapietra F., …& Cecchinato A. (2022) In-line near-infrared analysis of milk coupled with machine learning methods for the daily prediction of blood metabolic profile in dairy cattle. *Scientific Reports*, no. 12, 8058. https://doi.org/10.1038/s41598-022-11799-0

13. Guerra A., Boselli C., Galli T., Ciofi L., Fichi G., De Marchi M., & Manuelian C. L. (2024) Low effectiveness of mid-infrared spectroscopy prediction models of Mediterranean Italian buffalo bulk milk coagulation traits. *Foods*, vol. 13, no. 13, 1957.https://doi.org/10.3390/foods13131957

14. Hetterich J. (2021) Using analytical hierarchy process (AHP) to introduce weights to social life cycle assessment of mobility services. *Sustainability*, vol. 13, no. 3, 1258. https://doi.org/10.3390/su13031258

15. Hu H., Zhou H., Cao K., Lou W., Zhang G., Gu Q., & Wang J. (2024) Biomass estimation of milk vetch using UAV hyperspectral imagery and machine learning. *Remote Sensing*, vol. 16, no. 12, 2183. https://doi.org/10.3390/rs16122183

16. ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (2017) *ISO: website*. Retrieved from https://www.iso.org/standard/66912.html

17. Khristoforova Y., Bratchenko L., & Bratchenko I. (2022) Combination of Raman spectroscopy and chemometrics: A review of recent studies published in the Spectrochimica Acta, Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy journal. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.10051

18. Medina-García M., Amigo J. M., Martínez-Domingo M. A., Valero E. M., & Jiménez-Carvelo, A. M. (2025) Strategies for analysing hyperspectral imaging data for food quality and safety issues: A critical review of the last 5 years. *Microchemical Journal*, no. 214, 113994. https://doi.org/10.1016/j.microc.2025.113994

19. Panagiotidou E., Chountalas P. T., Magoutas A. I., & Kotsopoulos T. A. (2025) Systematic identification and validation of critical success factors for ISO/IEC 17025 implementation. *Administrative Sciences*, vol. 15, no. 2, 60. https://doi.org/10.3390/admsci15020060

20. Scandurra G., Cardillo E., Ciofi C., & Ferro L. (2022) UHT milk characterization by electrical impedance spectroscopy. *Applied Sciences*, vol. 12, no. 15, 7559. https://doi.org/10.3390/app12157559

21. Ma Y. B., & Amamcharla J. K. (2021). A rapid method to quantify casein in fluid milk by front-face fluorescence spectroscopy combined with chemometrics. *Journal of Dairy Science*, vol. 104, no. 1, pp. 243–252. https://doi.org/10.3168/jds.2020-18799

22. Zhang H., Wisuthiphaet N., Cui H., Nitin N., Liu X., & Zha Q. (2021) Spectroscopy approaches for food safety applications: Improving data efficiency using active learning and semi-supervised learning. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.03765

23. Zhang Z.-Y., Su J.-S., & Xiong H.-M. (2025) Technology for the quantitative identification of dairy products based on Raman spectroscopy, chemometrics, and machine learning. *Molecules*, vol. 30, no. 2, 239. https://doi.org/10.3390/molecules30020239

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 17.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 62-5:681.5 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.7

М. І. ГОРБІЙЧУК
доктор технічних наук, професор
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0002-8586-1883

М. З. ВАСИЛЕНЧУК
аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0009-0008-9725-052X

М. І. КОГУТЯК
кандидат технічних наук, доцент
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0003-0026-7744

ІНВАРІАНТНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ШЛЯХОВИМ НАГРІВАЧЕМ НАФТИ

Проведений аналіз структурної схеми нагрівника нафти показав, що існує прямий канал – подача газу у камеру згорання – температура нафти на виході нагрівача та канали, по яким поступають збурення – температура нафти на вході в нагрівник і зміна витрати нафти, що поступає в нагрівник.

Запропоновані дві схеми стабілізації температури на виході нагрівника – каскадно-зв'язана і система з ПІ/ПД-регуляторами у прямому контурі керування. Каскадно-зв'язана система автоматичної стабілізації температури на виході нагрівника має у своєму складі два контури – основний і допоміжний. Основний контур утворений прямим каналом «паливний газ-температура на виході», в який включений ПІ-регулятор. Для побудови допоміжного контуру використаний канал «природний газ-температура димових газів», який має значно меншу інерційність ніж основний контур.

Система з ПІ/ПД-регуляторами у своїй структурі має ПІ-регулятор який безпосередньо діє на виконавчий механізм і ПД-регулятор, який включений охоплює від'ємним зворотним зв'язком керований об'єкт.

Порівняльний аналіз двох схемних рішень показав, що другий варіант забезпечує кращі показники якості керування у порівнянні з першим варіантом. Тому другий варіант вибраний як основний. Оскільки на систему автоматичного керування діють збурення, то в роботі запропонована інваріантна система автоматичного керування по відношенню температури нафти і зміна витрати нафти на вході в нагрівник. Виходячи із принципу двоканальності, синтезована структурна схема інваріантної системи та визначені передавальні функції компенсатора.

Для перевірки правильності отриманих рішень у середовищі MatLab/Simulink створена імітаційна модель інваріантної системи автоматичної стабілізації температури на виході нагрівника. При зміні збурень, як функцій часу результати імітаційного моделювання показали, що компенсатори повністю «гасять» змінні в часі збурення.

Ключові слова: *нагрівач нафти, система автоматичне керування, інваріантність, ПІ/ПД-регулятор, якість процесу.*

M. I. HORBIICHUK
Doctor of Technical Sciences, Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0002-8586-1883

M. Z. VASYLENCHUK
Postgraduate Student at the Department of Automation
and Computer-Integrated Technologies
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0009-0008-9725-052X

M. I. KOHUTIAK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0003-0026-7744

© Горбійчук М. І., Василенчук М. З., Когутяк М. І., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

INVARIANT AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR OIL ROAD HEATER

The analysis of the structural diagram of the oil heater showed that there is a direct channel – the supply of gas to the combustion chamber – the oil temperature at the heater outlet, and disturbance channels – the oil temperature at the heater inlet and the change in the flow rate of oil entering the heater.

Two schemes for stabilizing the outlet temperature of the heater are proposed – a cascade-connected system and a system with PI/PD controllers in the direct control loop. The cascade-connected automatic temperature stabilization system at the heater outlet consists of two loops – the main and auxiliary. The main loop is formed by the direct channel "fuel gas–outlet temperature", which includes a PI controller. To build the auxiliary loop, the channel "natural gas–flue gas temperature" is used, which has much lower inertia than the main loop.

The system with PI/PD controllers has a PI controller in its structure that directly acts on the actuator, and a PD controller, which is included in the negative feedback loop of the controlled object.

A comparative analysis of the two schemes showed that the second option provides better control quality indicators compared to the first option. Therefore, the second option was chosen as the main one. Since the automatic control system is subject to disturbances, an invariant automatic control system with respect to the oil temperature and changes in oil flow rate at the heater inlet is proposed. Based on the principle of dual-channeling, the structural diagram of the invariant system was synthesized, and the transfer functions of the compensator were determined.

To verify the correctness of the obtained solutions, a simulation model of the invariant automatic temperature stabilization system at the heater outlet was created in the MatLab/Simulink environment. When disturbances change as functions of time, the simulation results showed that the compensators completely "eliminate" the time-varying disturbances.

Key words: *oil heater, automatic control system, invariance, PI/PD controller, process quality.*

Постановка проблеми

Останнім часом при підготовці нафти і газу до транспортування магістральними трубопроводами, або подачі природного газу споживачам, знайшли своє застосування шляхові нагрівачі нафти і природного газу.

На відміну від прямого нагріву в шляхових нагрівачах передача тепла, яке утворене внаслідок спалювання природного газу в камері згоряння, здійснюється опосередковано через проміжний теплоносій, яким найчастіше виступає вода. Відсутність прямого контакту джерела тепла з нагрівальними трубами, через протікає нафта або природний газ, зменшує ризики аварій

З точку зору автоматичного керування, шляховий нагрівач має значну інерційність, що ускладнює процес синтезу систем керування з високими показниками якості керування. Крім того на об'єкт діють зовнішні збурення – основні з них зміна температури та витрати нафти, яка поступає в нагрівник.

Тому актуальною науковою задачею є пошук нових структурно-параметричних рішень, які дадуть змогу синтезувати систему автоматичного керування процесом нагріву нафти у шляховому нагрівнику з високими показниками якості керування і, яка інваріантна до основних збурень – зміна температури та витрати нафти на вході в нагрівач.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Більшість робіт, у яких висвітлюються питання дослідження властивостей шляхових нагрівачів нафти і газу, зосередженні на питаннях покращення ефективності їх роботи.

Оскільки в таких нагрівачах тепло, отримане від спалювання природного газу, передається робочому тілу (газу або нафті) через проміжний теплоносій, яким найчастіше буває вода, то зусилля дослідників направлені на збільшення коефіцієнта корисної дії (ККД) нагрівника, який опосередковано залежить від теплопровідності проміжного теплоносія.

Збільшенню теплопровідності проміжного теплоносія (води) присвячена робота [1], у якій досліджували вплив нанотрубок на теплопровідність води. Експерименти проводились на експериментальній установці. До проміжного теплоносія додавали вуглецеві нанотрубки діаметром 20–30 нм, об'ємна частка яких у воді складала 0,025, 0,05, 0,1, 0,2 і 0,3. Результати експерименту показали, що коефіцієнт питомої теплоємності нанофлюїду збільшується з температурою, але не показує істотних змін зі збільшенням об'ємної частки.

У роботі [2] автори досліджували вплив ультразвуку на коефіцієнт теплопровідності води, яка є проміжним теплоносієм у шляхових нагрівачах. Враховуючи складні термофізичні явища, пов'язані з проблемою впливу ультразвуку на процеси передачі тепла через простір заповнений рідиною, для проведення експериментів був використаний лабораторно змодельований ультразвуковий нагрівач. Результати експериментів показали що. максимальне збільшення ультразвукової теплопередачі було оцінено як 166 % при швидкості потоку рідини 0,5 л/хв і потужності нагрівача 200 Вт.

Перед подачею газу споживачам з магістрального трубопроводу відбувається пониження тиску, що спричиняє утворення гідратів внаслідок ефекту Джоуля-Томпсона. Для запобігання такого явища газ попередньо нагрівають в шляхових нагрівачах. За підрахунками авторів роботи [3] ККД таких нагрівачів не перевищує 52 %. Для збільшення ККД у роботі [3, 4] запропоновано використовувати тепло димових газів для підігріву повітря, яке подається в камеру згоряння природного газу.

На основі створення математичної моделі нагрівача природного газу у роботі [5] розв'язана задача визначення технологічних параметрів нагрівача. У створеній моделі враховувано тепло поглинене природним газом,

тепло, передане в навколишнє середовище від труби, і тепло, що втрачається в навколишнє середовище від тіла нагрівача. Таким чином, модель є функцією клімату, геометрії нагрівача та характеристик природного газу, включаючи температуру, тиск і його склад. Проведені розрахунки з використанням створеної моделі дали змогу довести, що зниження температури і підвищення тиску газу на вході, потовщення ізоляції зі скловати і збільшення радіусу жарової труби призвели до збільшення теплового ККД нагрівача з 20 до 60 % і, як наслідок, зменшилася витрата палива нагрівача. Нарешті, вибір відповідної геометрії дав вищу ефективність нагрівача з підвищенням ККД від 44 % до 70 %.

Відмітимо, що створена модель у роботі [5] є статичною і не може бути використана для синтезу системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти (газу) в шляховому нагрівнику.

У цьому контексті слід відмітити роботу [6], в якій запропонована система автоматичного керування температурою на виході нагрівача. Контролер, який входить до складу такої системи, розраховує температуру гідроутворення на виході нагрівача і перераховує її на тиск газу. Інформація з контролера поступає на виконавчий пристрій, який керує подачею палива в камеру згоряння. Запропонована система є одноконтурною. У роботі не досліджені динамічні властивості такої системи і не оцінені показники якості процесу керування. З огляду на то, що шляхові нагрівачі мають значну інерцію, перехідні процеси в такій одноконтурній системі мають значну тривалість [7].

Відмітимо, що дослідження, які проводились різними авторами, направлені, перш за все, вирішення ключової технологічної задачі – підвищення ККД нагрівачів непрямої дії. Значно меншу вагу приділено створенню ефективних систем автоматичного керування процесом нагріву нафти (газу) в шляхових нагрівачах. Задача синтезу високоефективних систем керування шляховими нагрівачами ускладнюється через їх значну інерційність. Крім того об'єкт керування знаходиться під дією зовнішніх збурень, які слід враховувати для покращення якості процесу керування.

Формулювання мети дослідження

Синтез інваріантної системи керування процесом нагрівання нафти в шляховому нагрівачі з проміжним теплоносієм відносно збурень – зміна витрати та температури нафти на вході в нагрівач.

Викладення основного матеріалу дослідження

У шляхових нагрівачах нафти тепло, яке утворене згоранням попутного газу в камері згорання, передається до робочого тіла (нафту) через проміжний теплоносій – воду. У воду занурені жарові труби і пучок труб через які протікає нафта.

Наявність водяної бані зумовлює значну інерційність шляхового нагрівача як об'єкта автоматичного керування [7], що спричиняє певні труднощі при синтезі системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти.

Аналіз роботи шляхового нагрівника нафти дав змогу встановити (рис. 1), що вхідною величиною є витрата паливного газу, яка регулюється виконавчим пристроєм за допомогою командного сигналу U. На керований об'єкт (шляховий нагрівник) діють збурення – температура нафти T_n^{in} і зміна витрати нафти G_n на вході в нагрівник. Вихідними величинами об'єкта є температура нафти T_n^{out} на виході із нагрівника і температура T_{dg} димових газів.

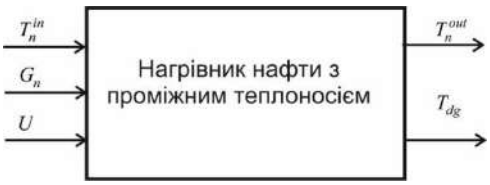


Рис. 1. Функціонально-структурна схема шляхового нагрівника

Для покращення якості процесу керування у роботі [8] запропонована каскадно-зв'язана система автоматичного керування, у якій основним контуром є «подача паливного газу – температура нафти на виході», а додатковий контур утворений сигналом давача температури димових газів. В основний контур керування включений ПІ-регулятор, а в додатковий П-регулятор.

У роботах [9, 10] визначені параметри передавальних функцій за всіма каналами передачі сигналів «вхід-вихід», що дало змогу здійснити комп'ютерне моделювання каскадно-зв'язаної системи керування та визначити показники процесу керування – перерегулювання σ і час регулювання t_c. Отримані такі значення таких показників: σ = 24 %; t_c = 187,9 с.

З метою виявлення можливості покращення якості процесу керування створена інваріантна система автоматичного керування, структурна схема якої зображена на рис. 2. Система має у своєму складі дві підсистеми – стабілізації температури T_n^{out} $(y = T_n^{out})$ на виході нагрівника та компенсації збурень, які діють на об'єкт керування, якими є зміна витрати нафти, що поступає в нагрівник $f_1 = G_n$ та температура нафти на його вході $f_2 = T_n^{out}$.

Підсистема стабілізації температури T_n^{out} складається об'єкта керування з передавальною функцією $W_{ob}(s)$, пропорційна-інтегрального регулятора *PI* з передавальною функцією $W_{PI}(s)$. Об'єкт керування охоплений місцевим

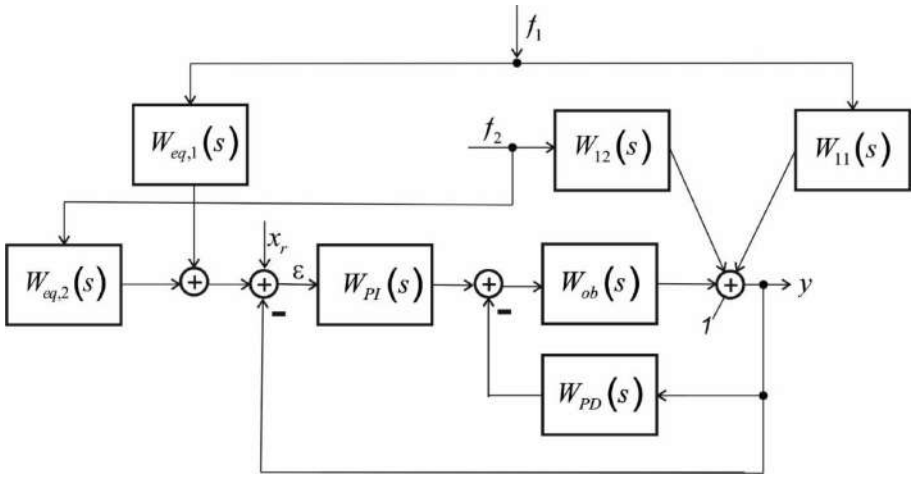


Рис. 2. Структурна схема інваріантної системи керування шляховим нагрівачем

від'ємним зворотним зв'язком, у коло якого включений пропорційно-диференційний регулятор *PD* з передавальною функцією $W_{PD}(s)$.

Підсистему компенсації утворюють канали поширення збурень, які характеризуються передавальними функцією $W_{11}(s)$ і $W_{12}(s)$ та компенсатори збурень з передавальними функціями $W_{eq,1}(s)$ та $W_{eq,2}(s)$.

Виходячи із принципу суперпозиції, створена математичну модель інваріантної системи автоматичного керування (рис. 2)

$$Y(s) = W_{yx_r}(s)X_r(s) + W_{yf_1}(s)F_1(s) + W_{yf_2}(s)F_2(s), \tag{1}$$

де $W_{yx_r}(s)$ – передавальна функція підсистеми стабілізації температури T_n^{out} відносно вставки *PI*-регулятору; $W_{yf_1}(s)$ і $W_{yf_2}(s)$ – передавальні функції підсистеми компенсації збурення.

Синтез підсистеми стабілізації температури здійснений в роботі [11]. Метою синтезу було визначення параметрів налаштування ПІ- та ПД-регуляторів (рис. 2).

Алгоритм розрахунку параметрів налаштування ПІ- та ПД-регуляторів розроблений з використанням комбінованого методу [12]. Передавальні функції ПІ- та ПД-регуляторів були такими:

$$W_{PI}(s) = \frac{C_0^{(1)}s + C_1}{s}, \qquad W_{PD}(s) = C_0^{(2)}s + C_2. \tag{2}$$

За допомогою програмного забезпечення, розробленого в середовищі MatLab, були визначені параметри $C_0^{(1)}$, $C_0^{(2)}$, C_1 і C_2 налаштування ПІ- та ПД-регуляторів, а також показники якості процесу керування. Результатом розрахунків є такі значення: $C_0^{(1)} = 1{,}1506 \cdot 10^3$, $C_0^{(2)} = 3{,}7738 \cdot 10^2$, C_1 = 18,427, C_2 = 2,7357 · 10^4; t_c = 58,5 с, перерегулювання – відсутнє.

Отже, запропонований в роботі [11] структурно-параметричний синтез підсистеми стабілізації дав змогу зменшити час регулювання в 3.2 рази у порівнянні з каскадно-зв'язаною системою керування при відсутності перерегулювання.

Підсистема компенсації збурень (рис. 2) повинна забезпечити інваріантність вихідної координати системи *y* по відношенню до збурень f_1 і f_2. Це означає, що другий і третій доданки у правій частині рівняння (1) повинен перетворитись в нуль. Оскільки $f_1 \neq 0$ і $f_2 \neq 0$, то умови рівності нулю складових $W_{yf_1}(s)F_1(s)$ і $W_{yf_2}(s)F_2(s)$ в формулі (1) будуть мати місце тоді, коли $W_{yf_1}(s) = 0$ і $W_{yf_2}(s) = 0$. Виконання останніх умов забезпечується певним вибором $W_{eq_1}(s)$ і $W_{eq_2}(s)$ – передавальних функцій компенсаторів (рис. 2).

Для розв'язання поставленої задачі необхідно визначити передавальні функцію $W_{yf_1}(s)$ і $W_{yf_2}(s)$. Для цього перенесемо суматор 1 через передавальну функцію $W_{ob}(s)$. Результат такого структурного перетворення зображений на рис. 3.

Внаслідок структурного перетворення (рис. 3) передавальні функції $W_{F,1}(s)$ і $W_{F,2}(s)$ будуть такими: $W_{F,1}(s) = \dfrac{W_{11}(s)}{W_{ob}(s)}$ і $W_{yf,2}(s) = \dfrac{W_{12}(s)}{W_{ob}(s)}$.

Якщо скористатись принципом суперпозиції, то $W_{yf_1}(s)$ визначимо із рис. 3, поклавши у ньому $x_r = 0$ і $f_2 = 0$, а для визначення $W_{yf_2}(s)$ необхідно прирівняти до нуля величини $x_r = 0$ і $f_1 = 0$. У результаті отримаємо структурні схеми, які зображені на рис. 4.

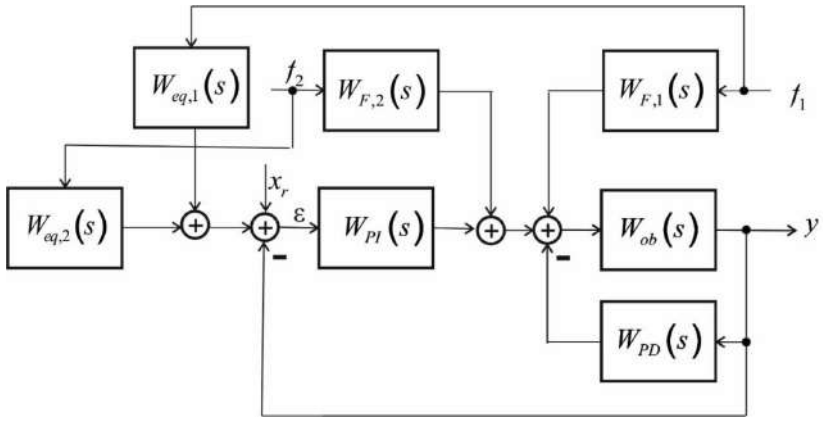
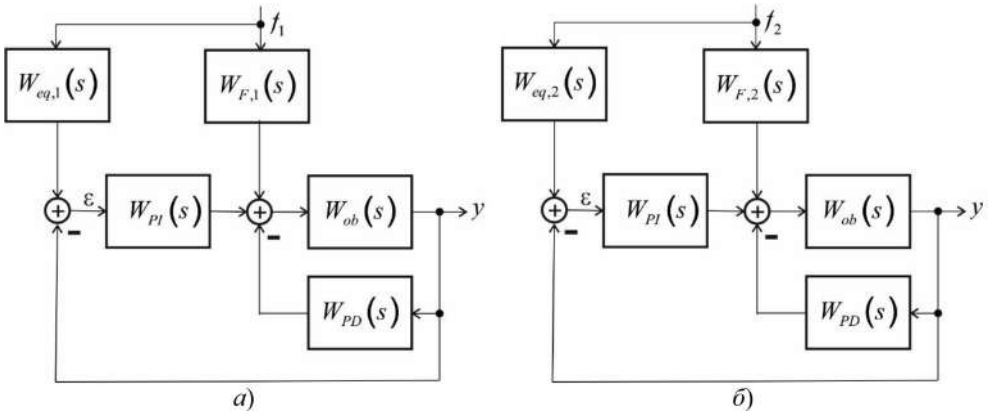


Рис. 3. Структурна схема інваріантної системи керування шляховим нагрівником після структурних перетворень



а) *б)*

Рис. 4. Структурні схеми інваріантної системи керування (*а*, $x_r = 0$ і $f_2 = 0$; *б*, $x_r = 0$ і $f_1 = 0$)

Після перенесення суматорів за ходом сигналу через передавальну функцію $W_{PI}(s)$ (рис. 4) та після нескладних структурних перетворень, прийшли до структурних схеми, які зображені на рис. 5. Передавальні функції $W_{f,1}(s)$ і $W_{f,2}(s)$ (рис. 4) є такими: $W_{f,1}(s) = \dfrac{W_{F,1}(s)}{W_{PI}(s)}$ і $W_{f,2}(s) = \dfrac{W_{F,2}(s)}{W_{PI}(s)}$.

З врахуванням значень $W_{F,1}(s)$ і $W_{F,2}(s)$, маємо: $W_{f,1}(s) = \dfrac{W_{11}(s)}{W_{ob}(s)W_{PI}(s)}$, $W_{f,2}(s) = \dfrac{W_{12}(s)}{W_{ob}(s)W_{PI}(s)}$.

Із структурної схеми, яка зображена на рис. 5, *а* знаходимо:

$$W_{yf,1}(s) = (W_{f,1}(s) + W_{eq,1}(s))\frac{W_{PI}(s)W_1(s)}{1 + W_{PI}(s)W_1(s)},$$

а із рис. 5, *б* маємо:

$$W_{yf,2}(s) = (W_{f,2}(s) + W_{eq,2}(s))\frac{W_{PI}(s)W_1(s)}{1 + W_{PI}(s)W_1(s)},$$

де $W_1(s) = \dfrac{W_{ob}(s)}{1 + W_{ob}(s)W_{PD}(s)}$.

Беручи до уваги величини $W_{f,1}(s)$, $W_{f,2}(s)$ і $W_1(s)$ приходимо до такого результату:

$$W_{yf,1}(s) = \frac{W_{11}(s) + W_{ob}(s)W_{PI}(s)W_{eq,1}(s)}{1 + W_{ob}(s)W_{PD}(s) + W_{PI}(s)W_{ob}(s)}, \tag{3}$$

$$W_{yf,2}(s) = \frac{W_{12}(s) + W_{ob}(s)W_{PI}(s)W_{eq,2}(s)}{1 + W_{ob}(s)W_{PD}(s) + W_{PI}(s)W_{ob}(s)}. \tag{4}$$

Оскільки умова інваріантності передбачає рівність нулю передавальних функції $W_{yf_1}(s)$ і $W_{yf_1}(s)$, то із формули (3) і (4) випливає, що $W_{11}(s) + W_{ob}(s)W_{PI}(s)W_{eq,1}(s)W_{PI}(s) = 0$ і $W_{12}(s) + W_{ob}(s)W_{PI}(s)W_{eq,2}(s) = 0$.

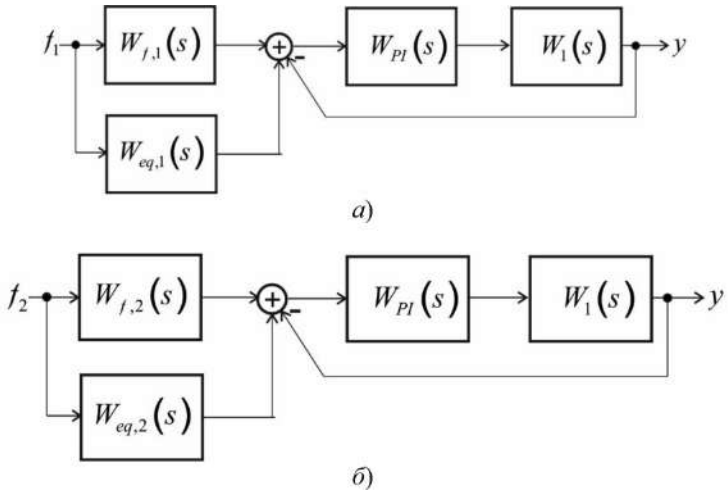


Рис. 5. Структурні схеми інваріантної системи після перетворень: *а*) $x_r = 0$ і $f_2 = 0$; *б*) $x_r = 0$ і $f_1 = 0$

Із останніх рівнянь знаходимо передавальні функції компенсаторів

$$W_{eq,1}(s) = -\frac{W_{11}(s)}{W_{ob}(s)W_{PI}(s)}, \tag{5}$$

$$W_{eq,2}(s) = -\frac{W_{12}(s)}{W_{ob}(s)W_{PI}(s)}. \tag{6}$$

Так як передавальна функція $W_{PI}(s)$ визначена формулою (3), то

$$W_{eq,1}(s) = -\frac{\beta_0 s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3}{\pi_0 s^3 + \pi_1 s^2 + \pi_2 s + \pi_3} \cdot \frac{(\alpha_0 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_2)s}{k_s (C_0^{(1)} s + C_1)}, \tag{7}$$

$$W_{eq,2}(s) = -\frac{b_0 s^2 + b_1 s + b_2}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3} \cdot \frac{(\alpha_0 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_2)s}{k_s (C_0^{(1)} s + C_1)}. \tag{8}$$

Оскільки поліноми чисельників передавальних функцій (7) і (8) більші за їх знаменників, то компенсатори *Eq*,1 і *Eq*,2 (рис. 2) фізично нездійсненні. Тому для фізичної реалізації компенсаторів *Eq*,1 і *Eq*,2 необхідно понизити порядки поліномів чисельників передавальних функцій (7) і (8).

Таке зменшення поліномів чисельників передавальних функцій (7) і (8) здійснимо, виходячи із умови близькості частотних характеристик вихідних і редукованих передавальних функцій, які входять до складу виразів (5) і (6). Діапазон частот для відповідних передавальних функцій із формул (5) і (6) повинен належати діапазону частот $\omega \in [0; \omega_{cf}]$, де ω_{cf} – частота зрізу керованого об'єкта, з передавальною функцією $W_{ob}(s)$ (рис. 2).

На рис. 6 зображена частотна характеристика керованого об'єкта, із якого випливає, що $\omega_{cf} = 10^{-3}$ с$^{-1}$.

За методом площ [13] у формулі (5) була редукована передавальна функція $W_{11}(s)$, а у формулі (6) – $W_{ob}(s)$. Результати редукції передавальних функцій $W_{11}(s)$ і $W_{ob}(s)$ відображає рис. 7.

Із рис. 7 видно, що в діапазоні частот $\omega \in [0; \omega_{cf}]$ є задовільне наближення частотних характеристик вихідних і редукованих моделей, які представлені передавальними функціями $W_{11}(s)$ і $W_{ob}(s)$.

Отже, отримали такі редуковані моделі:

$$W_{11}^{(r)}(s) = \frac{k}{\pi_0^{(r)} s^2 + \pi_1^{(r)} s + \pi_2^{(r)}},$$

$$W_{ob}^{(r)}(s) = \frac{k_{ob}}{\alpha_0^{(r)} s + \alpha_1^{(r)}}.$$

Тепер для отримання передавальних функцій компенсатора необхідно в (5) і (6) $W_{11}(s)$ і $W_{ob}(s)$ замінити на $W_{11}^{(r)}(s)$ і $W_{ob}^{(r)}(s)$. У результаті отримали такі передавальні функції компенсаторів:

$$W_{eq,1}(s) = \frac{b_{eq,1}^{(0)} s^3 + b_{eq,1}^{(1)} s^2 + b_{eq,1}^{(2)} s + b_{eq,1}^{(3)}}{a_{eq,1}^{(0)} s^3 + a_{eq,1}^{(1)} s^2 + a_{eq,1}^{(2)} s + a_{eq,1}^{(3)}}, \tag{9}$$

$$W_{eq,2}(s) = \frac{b_{eq,2}^{(0)} s^4 + b_{eq,2}^{(1)} s^3 + b_{eq,2}^{(2)} s^2 + b_{eq,2}^{(3)} s + b_{eq,2}^{(4)}}{a_{eq,2}^{(0)} s^4 + a_{eq,2}^{(1)} s^3 + a_{eq,2}^{(2)} s^2 + a_{eq,2}^{(3)} s + a_{eq,2}^{(4)}},$$

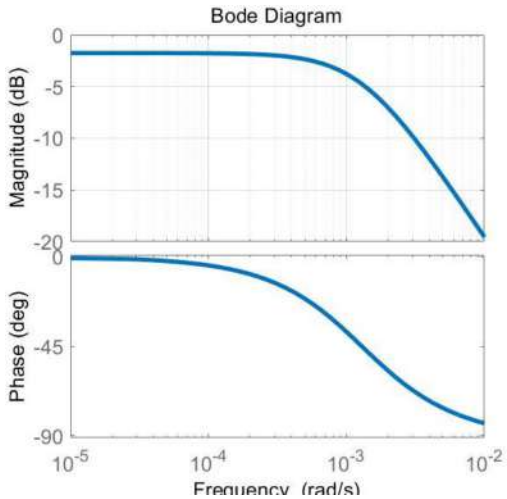


Рис. 6. Частотні характеристики керованого об'єкта

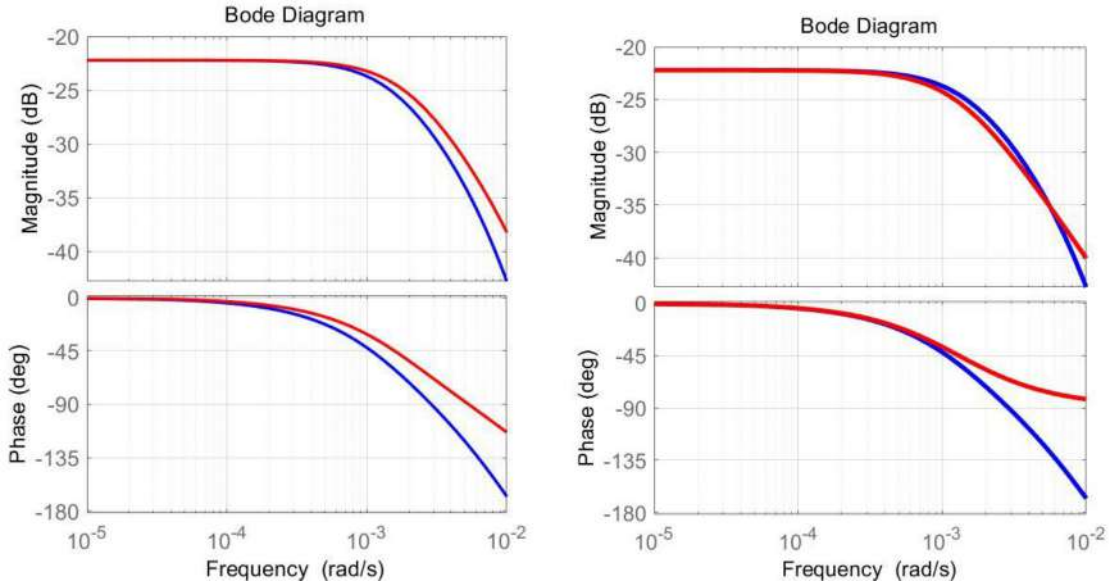


Рис. 7. Частотні характеристики «оригінальних» і редукованих передавальних функцій $W_{11}(s)$ (*а*) і $W_{ob}(s)$(*б*)

де $b_{eq,1}^{(0)} = 1.3387$, $b_{eq,1}^{(1)} = 7.3190 \cdot 10^{-1}$, $b_{eq,1}^{(2)} = 9.4824 \cdot 10^{-4}$, $b_{eq,1}^{(3)} = 0$, $a_{eq,1}^{(0)} = 77.898$ $a_{eq,1}^{(1)} = 1.6997$ $a_{eq,1}^{(2)} = 8.3925 \cdot 10^{-3}$ $a_{eq,1}^{(3)} = 1.8427 \cdot 10^{-5}$; $b_{eq,2}^{(0)} = 7.2830 \cdot 10^{4}$, $b_{eq,2}^{(1)} = 3.7804 \cdot 10^{3}$, $b_{eq,2}^{(2)} = 5.1579$, $b_{eq,2}^{(3)} = 4.3420 \cdot 10^{-4}$, $b_{eq,2}^{(4)} = 0$, $a_{eq,2}^{(0)} = 9.4835 \cdot 10^{3}$, $a_{eq,2}^{(1)} = 8.4643 \cdot 10^{2}$, $a_{eq,2}^{(2)} = 17.073$, $a_{eq,2}^{(3)} = 9.5387 \cdot 10^{-2}$, $a_{eq,2}^{(4)} = 1.5038 \cdot 10^{-6}$.

Перевірку працездатності синтезованої інваріантної системи здійснено шляхом імітаційного моделювання в середовищі MatLab/Simulink (рис. 8).

Необхідні дані для моделювання взяті із роботи [9].

Передавальна функція по каналу «температура нафти на виході – командний сигнал виконавчого пристрою»

$$W_{ob}(s) = \frac{k_s}{\alpha_0 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_2},$$

де $\alpha_1 = 771{,}85$, $\alpha_2 = 1$; $k_s = 8{,}173 \cdot 10^{-1}$.

Передавальна функція по каналу «зміна витрати нафти на вході – температура нафти на виході»

$$W_{11}(s) = \frac{\beta_0 s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3}{\pi_0 s^3 + \pi_1 s^2 + \pi_2 s + \pi_3}$$

«температура нафти на вході – температура нафти на виході»

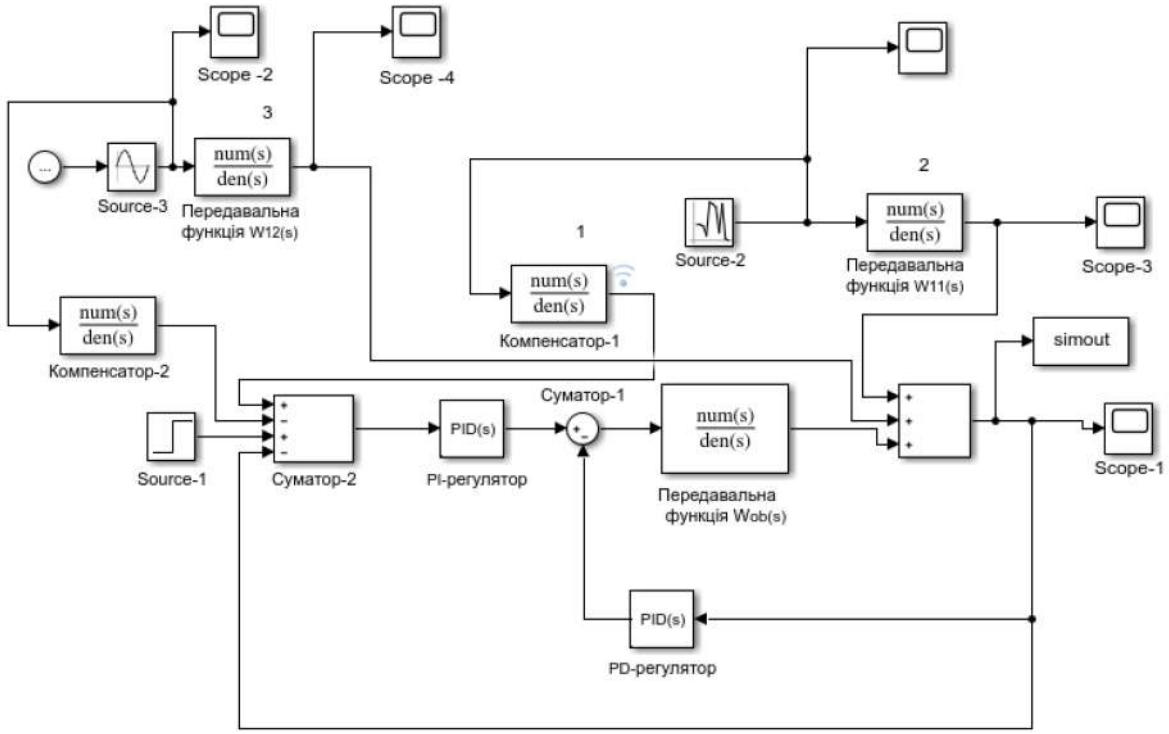


Рис. 8. Графічна модель інваріантної системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти в шляховому нагрівнику

$$W_{12}(s) = -\frac{b_0 s^2 + b_1 s + b_2}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3},$$

де $b_0 = 9.443 \cdot 10^4$, $b_1 = 4823$, $b_2 = 0{,}4342$; $a_0 = 1.010 \cdot 10^8$, $a_1 = 7{,}397 \cdot 10^6$, $a_2 = 6{,}337 \cdot 10^4$, $a_3 = 1$; $\beta_0 = -9{,}195 \cdot 10^5$, $\beta_1 = -5.242 \cdot 10^4$, $\beta_2 = 152{,}4$, $\beta_3 = 1{,}001$; $\pi_0 = 9{,}195 \cdot 10^5$, $\pi_1 = 6{,}905 \cdot 10^4$, $\pi_2 = 730{,}1$, $\pi_3 = 1$.

Графічна модель інваріантної системи (рис. 8), створена у відповідності із структурною схемою, яка зображена на рис. 2.

На вхід моделі подавались сигнали із блоків Source-1 і Source-2. Блок Source-1 реалізував таку стрибкоподібну функцію: $x_r = 50 \cdot 1(t)$. За допомогою блока Source-2 на другий вхід моделі подавалось збурення у вигляді синусоїдальної функції – $f(t) = A \sin(\omega t)$, де $A = 100$, $\omega = 0{,}5$ с$^{-1}$. Таке значення амплітуди A зумовлено значною інерційністю каналу передачі збурення з входу об'єкта на його вихід. Графіки сигналів на вході і виході блоку $W_{yf_1}(s)$, зображені на рис. 9.

Синусоїдальна форма сигналу $f_i(t)$, $i = 1, 2$ вибрана з метою демонстрації інваріантності системи до збурення, яке постійно змінюється в часі. При проходженні сигналу $f_i(t)$, $i = 1, 2$, наприклад, через блок 2 (рис. 8) відбувається зміна його амплітуди в часі (рис. 9, *б*), яка зумовлена динамічними властивостями блоку 2.

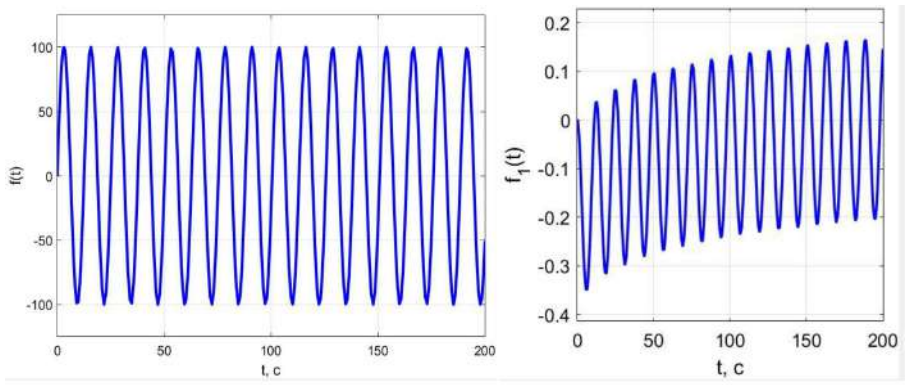
Імітаційне моделювання проводили за таким планом. При значенні $f_i(t)$, $i = 1, 2$ – збурення відсутнє – за допомогою створеної Simulink-моделі (рис. 8) отримали графік перехідного процесу; потім подали на вхід блоків 2 і 3 збурення $f_i(t) = A_i \sin(\omega_i t)$, $i = 1, 2$ і зафіксували графік перехідного процесу. У першому і другому дослідженні x_r залишалось незмінним.

Другий комп'ютерний експеримент здійснений шляхом подачі випадкового гаусівського процесу на вхід блоків 2 і 3. На рис. 10, *а*, як приклад, зображений сигнал, який поступав на вхід блоку 2, а на рис. 10, *б* зображений сигнал на його виході.

Результат імітаційного моделювання інваріантної системи автоматичного керування відображено на рис. 11.

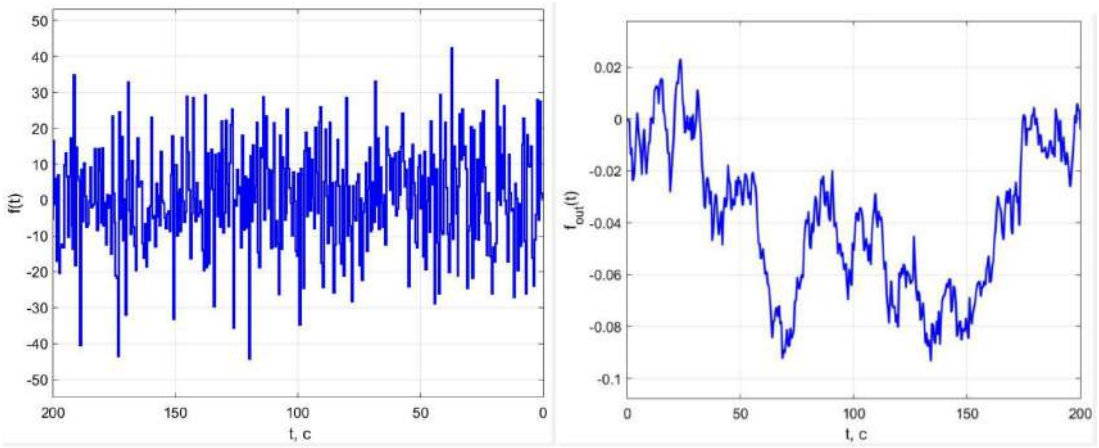
Аналіз результатів імітаційного моделювання показали, що наявність контурів передач збурень по каналах, які включають компенсатори $W_{eq,1}(s)$ і $W_{eq,2}(s)$, забезпечують інваріантність системи по відношення до збурень – зміна витрати подачі нафти в шляховий нагрівач і температура на його вході. Ілюстрацією такого твердження є рис. 8, на якому зображені перехідні характеристики інваріантної системи для двох випробувань. У першому випробуванні відсутні збурення, а в другому – збурення у вигляді синусоїдальної функції та випадкового гаусового процесу, які діяли на систему.

Отримані перехідні характеристики демонструють високу ступінь співпадіння, що свідчить про інваріантність системи при змінному в часі сигналів і $f_2(t)$.



а) *б)*

Рис. 9. Сигнали на вході (а) і виході (б) блоку 2 з передавальною функцією $W_{yf_1}(s)$



а) *б)*

Рис. 10. Випадкові сигнали на вході (*а*) і виході (*б*) блоку 2 з передавальною функцією $W_f(s)$

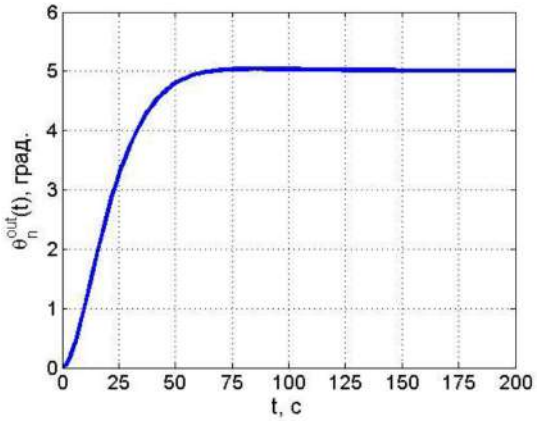


Рис. 11. Результат імітаційного модулювання інваріантної системи автоматичного керування

Для практичної реалізації коректорів необхідно перейти у дискретну форму (10) і отримаємо передавальні функції $H_{eq.1}(z)$, $H_{eq.2}(z)$.

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} c_i z^{-i}}{1 + \sum_{k=1}^{M-1} d_k z^{-k}}. \qquad (10)$$

Слід відмітити, що для отримання стійкого представлення необхідно правильно підібрати крок квантування t_0. Для розглянутих каналів впливу за крок квантування можна прийняти t_0 = 1 с, що дозволить зсунути полюси

коректорів від межі одиничного кола і цим забезпечити стабільність реалізації цифрового еквівалента коректора з врахуванням одинарної точності розрахунків.

В результаті перетворень знайдемо наступні передавальні функції в дискретній області:

$$H_{eq.1}(z)=\frac{2.207\cdot10^{-2}-5.69\cdot10^{-2}z^{-1}+4.76\cdot10^{-2}z^{-2}-1.277\cdot10^{-2}z^{-3}}{1-2.978z^{-1}+2.957z^{-2}-0.9784z^{-3}};\tag{11}$$

$$H_{eq.2}(z)=\frac{7.68-30.33z^{-1}+44.91z^{-2}-29.56z^{-3}+7.292z^{-4}}{1-3.913z^{-1}+5.74z^{-2}-3.742z^{-3}+0.9146z^{-4}}.$$

Співвідношення вхід/вихід лінійної дискретної системи (ЛДС) однозначно пов'язане з його основною характеристикою в Z-області – передавальною функцією і має вигляд лінійного математичного перетворення у вигляді різницевого рівняння (РР):

$$y(n)=\sum_{i=0}^{N-1}c_i x(n-i)-\sum_{k=1}^{M-1}d_k y(n-k),\tag{12}$$

де c_i, d_k – раціональні коефіцієнти РР – параметри ЛДС; i, k – значення затримок впливу та реакції; $(N-1)$, $(M-1)$ – константи, що визначають максимальні затримки.

Можна реалізувати цифровий коректор декількома способами:

– пряма реалізація за різницевим рівнянням (12), для невисоких порядків коректора;
– розклад в каскадну форму з використанням множників другого порядку;
– представлення в паралельну форму з використанням доданків першого та другого порядку.

Розглянемо варіант представлення (11) добутком множників другого порядку:

$$H(z)=\prod_{k=1}^{L}\frac{c_{0k}+\tilde{c}_{1k}z^{-1}+\tilde{c}_{2k}z^{-2}}{1+d_{1k}z^{-1}+d_{2k}z^{-2}},\tag{13}$$

де $c_{0k},\tilde{c}_{1k},\tilde{c}_{2k},d_{1k},d_{2k}$ – раціональні коефіцієнти рекурсивних ланок 2-го порядку, які називають біквадратними; L – кількість ланок, рівна

$$L=\text{int}\left(\frac{M-1}{2}\right),$$

де *int* – функція округлення до найближчого цілого у бік збільшення.

Каскадній структурі з біквадратних ланок відповідає подання передавальної функції у вигляді залежності (13):

$$H(z)=G\prod_{k=1}^{L}\frac{1+c_{1k}z^{-1}+c_{2k}z^{-2}}{1+d_{1k}z^{-1}+d_{2k}z^{-2}},\tag{14}$$

$G = c_{01}\cdot c_{02}\cdot ...\cdot c_{0L}$ – коефіцієнт підсилення, а відповідні коефіцієнти пов'язані співвідношеннями: $c_{1k}=\tilde{c}_{1k}/c_{0k}$; $c_{2k}=\tilde{c}_{2k}/c_{0k}$.

Результати розкладу на секції передавальних функцій коректорів (11) представлені в табл. 1.

Для автоматизації шляхового підігрівника нафти вибрано PLC **Modicon M172** із оновленої лінійки контролерів **M171/M172/M173** компанії *Schneider Electric*, які застосовують для керування HVAC системами (опалення, вентиляція, кондиціювання), комерційними машинами та іншим технологічним обладнанням середньої складності. Контролер з модулями розширення може підтримувати до 238 аналогових та дискретних входів/виходів, має широку номенклатуру інтерфейсів (CAN, RS485 та Ethernet), та вбудований дисплей. Все це дозволяє легко апаратно інтегрувати його в комп'ютерно інтегровані системи керування на промислах. Для програмування PLC M172 застосовують всі п'ять стандартизованих мови програмування міжнародного стандарту *IEC 61131-3*.

Аналіз програмної реалізації типових схем компенсаторів на базі різницевих рівнянь показує, що для цього необхідні певні базові алгоритми у арсеналі PLC, а саме: багатоканальних суматорів, блоки множення та ланцюжки буферних елементів запам'ятовування для вхідних та вихідних сигналів (зсувні регістри типу FIFO). В бібліотеці базових алгоритмів PLC M172 відсутні функціональні блоки зсувних регістрів FIFO, що ускладнює пряму реалізацію коректора.

Однак інтегроване середовище розробки PLC EcoStruxure Machine Expert-HVAC підтримує можливість розробляти потрібний алгоритм високорівневою мовою ST, або використовувати її для програмування власних блоків користувача.

Тому для реалізації каскадної структури коректора з біквадратних ланок доцільно створити власний функціональний блок користувача. З кожним заданим періодом квантування у функціональному блоці підраховується вихід секції за рівнянням (15) та запам'ятовуються в регістрах FIFO попередні значення входів та виходів з відповідним зсувом.

$$y(n)=G\cdot(c_0x(n)+c_1x(n-1)+c_2x(n-2)-d_1y(n-1)-d_2y(n-2)).\tag{15}$$

Таблиця 1

Параметри представлення $H_{eq.1}(z)$ та $H_{eq.2}(z)$ біквадратними секціями

Секція, k	c_{0k}	c_{1k}	c_{2k}	d_{0k}	d_{1k}	d_{2k}
Коректор $H_{eq.1}(z)$, $G_{eq.1} = 2.2068e-02$						
1	1	–0.5796	0	1	–0.9841	0
2	1	–1.9987	0.9987	1	–1.9942	0.9942
Коректор $H_{eq.2}(z)$, $G_{eq.2} = 7.6797$						
1	1	–1.9508	0.9508	1	–1.9227	0.9237
2	1	–1.9986	0.9986	1	–1.9901	0.9901

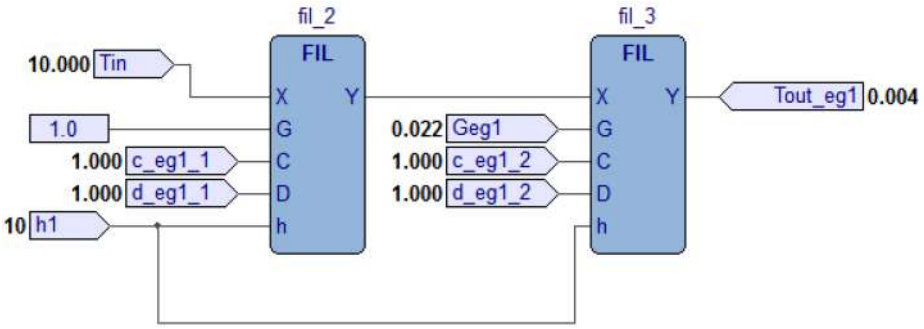
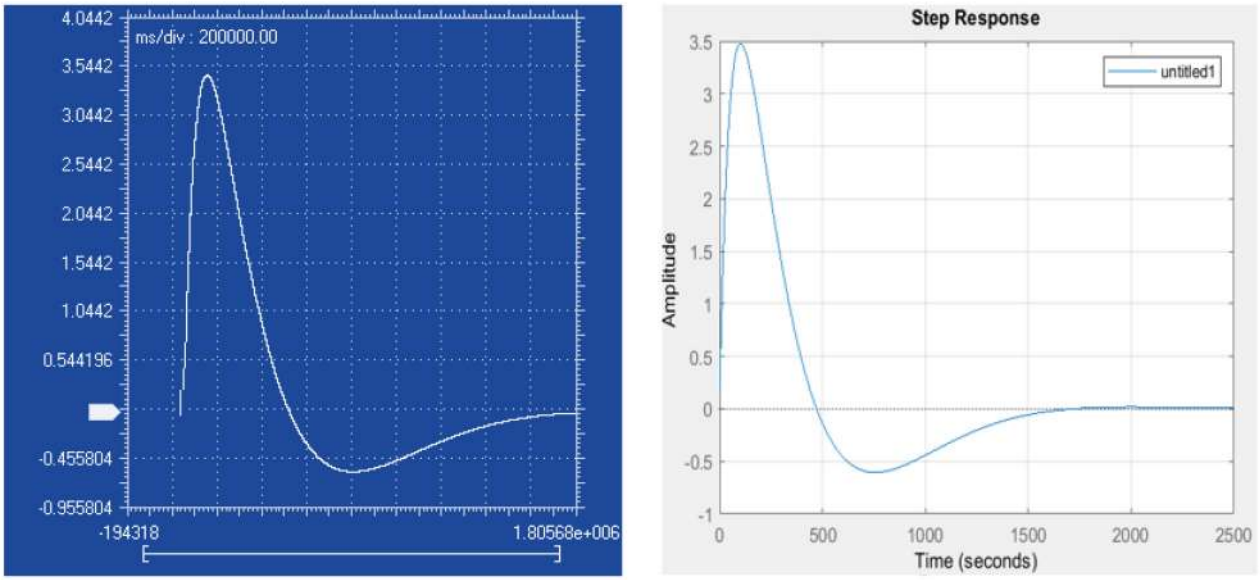


Рис. 12. Реалізація та перевірка роботи коректора $H_{eq.1}(z)$

Функціональний блок секції *FIL* програмно реалізований текстовою мовою *ST*. Входами блоку є відповідні матриці коефіцієнтів C і D та підсилення каналу G. Оскільки такт роботи контролера $0.1c$, а підрахунки в секції треба виконувати з періодом квантування $1c$ введено ще один вхід за яким відслідковується кратність тактів контролера. В секції реалізовано також регістри *FIFO* для змінних x та y у вигляді векторів

$$X\{x[0.1nh], x[0.1(n-1)h], x[0.1(n-2)h]\}, \quad Y\{y[0.1nh], y[0.1(n-1)h], y[0.1(n-2)h]\}.$$

Коректор відтворений графічною мовою *FBD* (рис. 12) і складається з послідовно включених екземплярів розробленого блоку *FIL*. На вхід першого блоку fil_2 подаються необхідні параметри для першої секції коректора $H_{eq.1}(z)$ (табл. 1). До входу X підведене каліброване цифрове значення від давача контрольованої температури нафти на вході підігрівника. Давач підключений до апаратного модуля аналогового входу. Константа на вході $G = 1$. Змінна $h1 = 10$ відповідає за такт роботи коректора з періодом 1 с.



а) б)

Рис. 13. Результати тестування роботи коректора $H_{eq.1}(z)$: *а*) – цифрова реалізація коректора на PLC M172; б) – реалізація в неперервній області

Екземпляр функціонального блоку fil_3 реалізує другу біквадратну секцію коректора з набором відповідних параметрів. Змінна *Geg*1 рівна коефіцієнту посилення коректора. Вихідна змінна *Tout_eg1* є коригуючим сигналом для компенсації впливу зміни параметра *Tin* на систему регулювання температури нафти.

Результати тестування роботи коректора з використанням ***Oscilloscope*** середовища розробки EcoStruxure Machine Expert – HVAC показана на рис. 13.

Аналогічно програмно реалізований цифровий коректор $H_{eq.2}(z)$. Відповідні параметри треба підібрати з табл. 1, а на вхід коректора необхідно подати цифровий еквівалент сигналу від давача витрати нафти на вході у підігрівник.

Висновки

1. З метою зменшення впливу збурень – зміна витрати і температури нафти на вході шляхового нагрівача на ефективність роботи системи автоматичної стабілізації температури, синтезовано інваріантну систему, яка складається з двох підсистем, а саме підсистеми стабілізації температури та підсистеми компенсації збурень.

2. Виходячи із принципу двоканальності, синтезовані компенсатори, які включений в коло компенсації збурень та визначені їх передавальні функції.

3. Створена імітаційна модель у середовищі Matlab/Simulink інваріантної системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти в шляховому нагрівнику дала змогу довести правильність прийнятих структурних рішень. Результати імітаційного моделювання показали, що відбувається повна компенсація збурень навіть при змінних в часі величин перешкод, що діють на вході об'єкта.

4. Синтезовано цифрові моделі коректорів та представлено варіант реалізації з використанням створеного функціонального блоку біквадратної секції на промисловому контролері M172 компанії *SCHNEIDER ELECTRIC*.

Список використаної літератури

1. Rahmati A. R., Reiszadeh M. An experimental study on the effects of the use of multi-walled carbon nanotubes in ethylene glycol/water-based fluid with indirect heaters in gas pressure reducing stations. Applied Thermal Engineering. 2018. Vol. 134. P. 107–117. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.111

2. Delouei A. A., Naeimi H., Sajjadi H., Atashafrooz M., Imanparast M., Chamkha A. J. An active approach to heat transfer enhancement in indirect heaters of city gate stations: An experimental modeling. Applied Thermal Engineering. 2024. Vol. 237. P. 121795. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121795

3. Rashidmardani A., Hamzehei M. Effect of various parameters on indirect fired water bath heaters' efficiency to reduce energy losses. International Journal of Science and Engineering Investigations. 2013. Vol. 2, No. 12. P. 17–24. URL: https://www.ijsei.com/papers/ijsei-21213-04.pdf

4. Khanmohammadi S., Shahsavar A. Thermodynamic assessment and proposal of new configurations of an indirect water bath heater for a City Gate Station (a case study). Energy Equipment and Systems. 2020. Vol. 8, No. 4. P. 349–365. DOI: https://doi.org/10.22059/ees.2020.241292

5. Mostafavi S. A., Shirazi M. Thermal modeling of indirect water heater in city gate station of natural gas to evaluate efficiency and fuel consumption. Energy. 2020. Vol. 212. P. 118390. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118390

6. Ebrahimi-Moghadam A., Deymi-Dashtebayaz M., Jafari H., Niazmand A. Energetic, exergetic, environmental and economic assessment of a novel control system for indirect heaters in natural gas city gate stations. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2020. Vol. 141, No. 6. P. 2573–2588. DOI: https://doi.org/10.1007/s10973-020-09413-4

7. Василенчук М., Горбійчук М., Когутяк М. Синтез лінеаризованих математичних моделей нагрівника з проміжним теплоносієм. Measuring and computing devices in technological processes. 2023. № 3. С. 144–153. DOI: https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-17

8. Горбійчук М., Василенчук М., Когутяк М. Система автоматичного керування процесом нагрівання нафти в шляховому нагрівнику. Measuring and computing devices in technological processes. 2024. № 4. С. 314–331. DOI: https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-39

9. Horbiichuk M. I., Vasylenchuk M. Z., Kohutiak M. I. Analytical studies on dynamic properties of indirect oil heaters. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2024. No. 6. P. 151–157. DOI: https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-6/151

10. Горбійчук М., Василенчук М. Синтез структурної схеми нагрівника нафти як об'єкта автоматичного керування. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2023. Т. 4(87). С. 44–52. DOI: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.5

11. Василенчук М., Горбійчук М. Структурно-параметричний синтез системи автоматичного керування шляховим нагрівником нафти. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2025. Vol. 355, No. 4. P. 112–119. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-16

12. Horbiichuk Mykhailo, Vasylenchuk Mykhailo, Yednak Ihor, Lahoida Andrii. Devising a combined method for setting PI/PID controller parameters for oil and gas facilities. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Vol. 1, No. 2(133). P. 85–95. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322424

13. Horbiichuk M. I., Lazoriv N. T., Kohutiak M. I., Manuliak I. Z. Experimental research on muffle furnace dynamic properties. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2023. No. 3. P. 144–150. DOI: https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-3/144

14. Горбійчук М., Заячук Я., Когутяк М. Практичні аспекти реалізації коректорів автоматичних систем керування. Measuring and computing devices in technological processes. 2024. № 1. С. 101–110. DOI: https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-13

References

1. Rahmati, A. R., & Reiszadeh, M. (2018). An experimental study on the effects of the use of multi-walled carbon nanotubes in ethylene glycol/water-based fluid with indirect heaters in gas pressure reducing stations. *Applied Thermal Engineering, 134*, 107–117. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.111

2. Delouei, A. A., Naeimi, H., Sajjadi, H., Atashafrooz, M., Imanparast, M., & Chamkha, A. J. (2024). An active approach to heat transfer enhancement in indirect heaters of city gate stations: An experimental modeling. *Applied Thermal Engineering, 237*, 121795. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121795

3. Rashidmardani, A., & Hamzehei, M. (2013). Effect of various parameters on indirect fired water bath heaters' efficiency to reduce energy losses. *International Journal of Science and Engineering Investigations, 2*(12), 17–24. https://www.ijsei.com/papers/ijsei-21213-04.pdf

4. Khanmohammadi, S., & Shahsavar, A. (2020). Thermodynamic assessment and proposal of new configurations of an indirect water bath heater for a City Gate Station (a case study). *Energy Equipment and Systems, 8*(4), 349–365. https://doi.org/10.22059/ees.2020.241292

5. Mostafavi, S. A., & Shirazi, M. (2020). Thermal modeling of indirect water heater in city gate station of natural gas to evaluate efficiency and fuel consumption. *Energy, 212*, 118390. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118390

6. Ebrahimi-Moghadam, A., Deymi-Dashtebayaz, M., Jafari, H., & Niazmand, A. (2020). Energetic, exergetic, environmental and economic assessment of a novel control system for indirect heaters in natural gas city gate stations. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 141*(6), 2573–2588. https://doi.org/10.1007/s10973-020-09413-4

7. Vasylenchuk M., Horbiichuk M., & Kohutyak M. (2023). Synthesis of linearized mathematical models of the heater with intermediate heat carrier. *Measuring and computing devices in technological processes*, (3), 144–153. https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-17

8. Horbiichuk M., Vasylenchuk M., & Kohutiak M. (2024). System of automatic control of the oil heating process in the way heater. *Measuring and computing devices in technological processes*, (4), 314–331. https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-80-39

9. Horbiichuk, M. I., Vasylenchuk, M. Z., & Kohutiak, M. I. (2024). Analytical studies on dynamic properties of indirect oil heaters. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2024*(6), 151–157. https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-6/151

10. Horbiichuk, M. I., & Vasylenchuk, M. Z. (2023). Synthesis of the structural diagram of the oil heater as an object of automatic control. *Visnyk of Kherson National Technical University, 2023*(4(87)), 44–52. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.5

11. Horbiichuk, M. I., & Vasylenchuk, M. Z. (2025). Structural-parametric synthesis of the automatic control system for a oil road heater. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, *355*(4), 112–119. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-16

12. Horbiichuk Mykhailo, Vasylenchuk Mykhailo, Yednak Ihor, & Lahoida Andrii. (2025). Devising a combined method for setting PI/PID controller parameters for oil and gas facilities. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 1 (2) (133). 85–95. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322424

13. Horbiichuk, M. I., Lazoriv, N. T., Kohutiak, M. I., & Manuliak, I. Z. (2023). Experimental research on muffle furnace dynamic properties. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2023*(3), 144–150. https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-3/144

14. Horbiichuk, M., Zaiachuk, Y., & Kohutiak M. (2024). Practical aspects of implementating the automatic control systems correctors. *Measuring and computing devices in technological processes*, (1), 101–110. https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-13

Дата першого надходження рукопису до видання: 18.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 675.026.22:66.011 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.8

А. Г. ДАНИЛКОВИЧ
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри біотехнології, шкіри та хутра
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0002-5707-0419

О. А. ОХМАТ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри біотехнології, шкіри та хутра
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0003-0927-8706

ОПТИМІЗАЦІЯ СИНТАН-ТАНІДНОЇ КОМПОЗИЦІЇ ДЛЯ НАПОВНЮВАННЯ ЕЛАСТИЧНОГО ШКІРЯНОГО МАТЕРІАЛУ

Метою роботи є розроблення оптимального складу синтан-танідної наповнювальної композиції для формування еластичного шкіряного матеріалу з використанням багатокритеріальної оптимізації. Для реалізації поставленої мети використано шкіряний напівфабрикату хромового дублення з ялівки середньої товщиною 1,1–1,2 мм.

На основі апріорних досліджень розроблено оптимальний склад синтан-танідної наповнювальної композиції для формування еластичного шкіряного матеріалу з використанням математичного моделювання. В процесі багатокритеріальної оптимізації складу наповнювальної композиції проведено апріорний експеримент. Синтезовано і реалізовано план експерименту з використанням алгоритму Макліна-Андерсона і розробленої програми обчислення потоками D-оптимального плану та отримана математична модель складу наповнювальної синтан-танідної композиції. На основі функції бажаності Харрінгтона встановлено оптимальні витрати інгредієнтів наповнювальної композиції та властивості отриманого напівфабрикату.

Встановлено оптимальний склад синтан-танідної композиції, мас. %: алкілкарбоксиетаноламіни аліфатичних кислот C_{7-9} – 7,7, синтан нафтолсульфокислоти, діоксідіфенілсульфона з формальдегідом – 19,3; екстракт мімози – 31,5; екстракт квебрахо – 41,5. Це дозволяє скоротити витрати природних танідів на 19,0 %, формувати шкіряний матеріал з підвищеними об'ємним виходом, пористістю, зниженою жорсткістю відповідно на 11,8, 12,6 та 24,0 % порівняно з діючою технологією. Розроблена технологія наповнювання шкіряного напівфабрикату з використанням безфенольного синтану і алкілкарбоксиетаноламінів аліфатичних кислот C_{7-9} може бути рекомендована для виготовлення шкіряних матеріалів з інших видів сировини.

Ключові слова: *метод Макліна-Андерсона, багатопотокова програма, синтез плану, синтан-танідна композиція, властивості шкіри.*

A. H. DANYLKOVYCH
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Biotechnology, Leather and Fur
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0002-5707-0419

O. A. OKHMAT
PhD of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Biotechnology, Leather and Fur
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0003-0927-8706

OPTIMIZATION OF A SYNTAN-TANNIN COMPOSITION FOR FILLING ELASTIC LEATHER MATERIAL

The goal of this work is to develop an optimal syntan–tannin filling composition for the production of elastic leather material using multicriteria optimization. To achieve this goal, a chrome-tanned leather semi-finished product from heifer hide with an average thickness of 1.1–1.2 mm was used.

© Данилкович А. Г., Охмат О. А., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Based on a priori studies, an optimal syntan–tannin filling composition was developed using mathematical modeling. In the process of multicriteria optimization of the filling composition, an a priori experiment was conducted. An experimental plan was synthesized and implemented using the McLean–Anderson algorithm and a custom-developed multi-threaded program for computing a D-optimal plan. A mathematical model of the syntan–tannin filling composition was obtained. Based on Harrington's desirability function, the optimal consumption of the filling composition ingredients and the properties of the resulting semi-finished product were determined.

The optimal composition of the syntan–tannin mixture was established (in mass %): alkylcarboxyethanolamines of aliphatic acids $C_{7–9}$ – 7.7; syntan based on naphthol sulfonic acid, dioxydiphenyl sulfone, and formaldehyde – 19.3; mimosa extract – 31.5; quebracho extract – 41.5.

This enables a 19.0 % reduction in the consumption of natural tannins, while providing a leather material with an increased volume yield, porosity, and reduced stiffness by 11.8 %, 12.6 %, and 24.0 %, respectively, compared to the current technology. The developed filling technology for leather semi-finished products using a phenol-free syntan and alkylcarboxyethanolamines of aliphatic acids $C_{7–9}$ can be recommended for the production of leather materials from other types of raw hides.

Key words: *McLean-Anderson method, multi-threaded program, plan synthesis, syntan-tannin composition, leather properties.*

Постановка проблеми

Враховуючи складні технології формування шкіряних матеріалів, що вимагають застосування широкого асортименту хімічних реагентів і необхідність їх ефективного використання, виникає необхідність проведення їх математичного моделювання. У цьому відношенні важливим є оптимізація складу композицій на різних стадіях виготовлення шкіряного матеріалу. При цьому технологічний процес наповнювання шкіряного напівфабрикату хромового дублення має суттєве значення з точки зору набуття готовим матеріалом фінішних властивостей. Зокрема це стосується міцності, еластичності, гігієнічності, зовнішнього виду, та інших властивостей шкіри [1, 2]. Водночас підвищується однорідність структури і фізико-механічні властивості різних топографічних ділянок напівфабрикату, особливо периферійних. При цьому оптимізація складу наповнювальної композиції дає можливість підвищити економічну і екологічну ефективність виготовлення еластичного шкіряного матеріалу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У технології виготовлення еластичних шкір особлива увага приділяється процесу наповнювання напівфабрикату хромового дублення у зв'язку з використанням широкого асортименту хімічних реагентів синтетичного та природного походження. На цій стадії великого значення набуває проблема їх ефективного застосування. У роботі [3] досліджено вплив дисперсій поліакрилатів і полімалеїнату на процес наповнювання напівфабрикату хромового дублення. Встановлено підвищення пористості та паропроникності отриманого напівфабрикату при збільшенні розміру частинок дисперсій полімерів від 17 нм до 262 нм при їх використанні на завершальній стадії процесу. Авторами [4] розроблена технологія виробництва шкіри, в якій при наповнюванні використані композиції рослинних дубителів у комбінації з синтинами і алюмосилікатами. Отримані за розробленою технологією еластичні шкіри відповідають вимогам стандарту до шкір для швейних виробів. У роботі [5] встановлено суттєве підвищення ефективності використання танідів під дією ензимів. Цей ефект обумовлений підвищенням їх дифузії в структуру напівфабрикату внаслідок подальшого розкриття волокнистої структури дерми. При цьому енергія активації взаємодії танідів з колагеном напівфабрикату знижується на 60 % [6]. У роботі [7] наведені результати дослідження впливу композиції на основі екстракту мімози на властивості шкіряного матеріалу з сировини великої рогатої худоби, який характеризується комплексом високих фізико-механічних властивостей.

У роботі [8] наведені результати математичної оптимізації складу трьохкомпонентної полімерної композиції полівінілового спирту, уретанового форполімеру, 2,4-толуїлендіізоціанату. При цьому використано модифікований симплексно-решітчастий план Шефе і отримано математичний опис процесу поліномом 4-го порядку. Отримане покриття стійке до впливу екстремальних умов зовнішнього середовища. Авторами [9] оптимізовано склад трьохкомпонентної полімерної композиції екзополісахариду, поліакрилату, поліуретану. Для цього використаний D-оптимальний симплексно-решітчастий план Кіфера. Отриманий склад покриття характеризується високими фізико-механічними і захисними властивостями. У роботі [10] використано ортогональний центральний композиційний план для оптимізації складу композиції на основі епоксидіанового олігомеру ЕД-20 і поліетиленполіаміну. Отримана модель забезпечила формування оптимального складу захисного покриття з комплексом високих експлуатаційних властивостей. Авторами [11] проведено математичне моделювання процесу рідинного оздоблювання шкіряного напівфабрикату Wet Blue з використанням акрилової композиції полімеру Syntan RS-540 та модифікованих жирів Sulphirol EG 60 і Synthol LC. Отриманий математичний опис процесу рідинного оздоблювання напівфабрикату хромового дублення дав можливість визначити раціональні параметри його фінішного оброблення. При цьому розроблена технологія забезпечила отримання еластичної шкіри з необхідним комплексом експлуатаційних і споживних властивостей за зниженої витрати сировини і хімічних реагентів.

Отже, у зв'язку з використанням для наповнювання шкіряного напівфабрикату хромового дублення великої кількості хімічних реагентів, витрати яких змінюються в широких межах, та їх екологічними недоліками виникає об'єктивна необхідність в розробленні ефективних екологічно орієнтованих технологій. Слід відзначити практичну відсутність математично оптимізованих технологій виробництва шкіряних матеріалів, зокрема еластичного виду.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи полягає в розробленні оптимального складу синтан-танідної наповнювальної композиції для формування еластичного шкіряного матеріалу з використанням багатокритеріальної оптимізації. Для вирішення даної мети були поставлені наступні задачі:

– синтез плану експерименту за методом Макліна-Андерсона;

– розрахунок адекватної математичної моделі експерименту;

– встановлення оптимального складу синтан-танідної композиції.

Викладення основного матеріалу дослідження

У роботі використано шкіряний напівфабрикату хромового дублення товщиною 1,1–1,2 мм з ялівки середньої, отриманий після стругання на ПрАТ Баришевський шкіряний завод. Для визначення впливу процесу наповнювання на фізико-хімічні властивості шкіри використано по шість зразків розміром 200 × 200 мм з периферійної ділянки напівфабрикату – поли. У складі синтан-танідної композиції фінішного наповнювання обрані реагенти, % маси напівфабрикату:

– синтетичний безфенольний дубитель на основі конденсації 2-нафтолсульфокислоти, діоксідіфенілсульфона з формальдегідом (НСК-ДОФС) усереднений аміаком з вмістом дубильних речовин 62,0 %, і pH 3,5–4,3;

– алкілкарбоксиетаноламіни у вигляді солі моноетаноламіну і аліфатичних кислот C_{7-9} (АКЕА АК) з середньою молекулярною масою 205 і pH при концентрації розчину 0,04 моль/дм^3 – 8,7;

– екстракт мімози і квебрахо з вмістом танідів відповідно 81,7 та 80,5 %.

Крім того, на попередніх підготовчих стадіях наповнювання використані хімічні реагенти фірми Smit Wet End (Нідерланди):

– акриловий кополімер Syntan RS-540;

– Syntan S, що містить ароматичну сульфовану кислоту та сірку з кремнієм;

– Syntan DF-585 на основі діціандіаміду з вмістом лігносульфонату, алюмосилікату, карбонатів.

Ефективність дії хімічних реагентів у складі синтан-танідної композиції оцінювали об'ємним виходом, пористістю шкіряного матеріалу та жорсткістю за типовими методиками [12]. Зокрема, об'ємний вихід отриманої шкіри визначали за об'ємом напівфабрикату, що містить 100 г білка; зокрема, за відношенням об'єму повітряно-сухого зразка шкіри наповненої композицією до об'єму добутку маси зразка на його уявну питому вагу в см^3/100 г колагену – голинної речовини (ГР). Пористість напівфабрикату – за відношенням об'ємів пор зразка, заміряних після їх заповнення авіаційним гасом, до його уявного об'єму. Жорсткість шкіри визначали на приладі «ПЖУ-12М» шляхом навантаження кульками масою 0,26 г зразка розміром 20 × 160 мм згорнутого у кільце правильної форми лицьовим боком назовні до деформування його на 1/3 діаметра. При цьому за жорсткість шкіри приймалась залишкова деформація зразка після його витримування по 30 с під навантаженням і після його розвантаження.

Наповнювання шкіряного напівфабрикату хромового дублення виконували після його нейтралізації до pH зрізу 4,8–5,2, ензимного оброблення та промивання у лабораторному підвісному барабані з внутрішнім діаметром 3 дм і об'ємом 18 дм^3 (рис. 1). При цьому співвідношення робочого розчину : маса напівфабрикату було як 0,5 : 1 відповідно, витраті композиції відповідно до плану експерименту (табл. 3), температурі 20 °С і постійному обертанні барабана зі швидкістю 18–20 хв$^{-1}$.

Для ефективного проведення процесу синтан-танідного наповнювання отриманого шкіряного напівфабрикату процес реалізовувався шляхом послідовного введення у реакційну систему хімічних реагентів. Спочатку для зміцнення структури сосочкового шару шкіряний напівфабрикат обробляли синтаном НСК-ДОФС сумісно з Syntan RS-540 при витратах відповідно 2,5 і 5,0 % маси напівфабрикату упродовж 30 хв. У подальшому для підвищення еластичності й пористості напівфабрикату в реакційну систему додавали 0,6 % АКЕА АК і перемішують упродовж 10 хв. Потім у барабан вводили синтани НСК-ДОФС, Syntan S і Syntan DF-585 з витратами відповідно 1,0; 2,0; 3,5 для розпушення структури напівфабрикату при перемішуванні ще протягом 30 хв. Для підвищення дифузії танідів у структуру напівфабрикату в реакційну систему додають АКЕА АК і синтан НСК-ДОФС при витратах відповідно 0,5–2,0 та 1,0–4,0. Як таніди використовуються екстракти мімози і квебрахо у співвідношенні 3 : 4 за витрат 4,0–8,0 при перемішуванні реакційної системи протягом 60 хв. При цьому забезпечується ефективна дифузія танідів у структуру напівфабрикату та їх фіксація з участю активних центрів колагену і йонізованих груп танідів. В останні 60 хв наповнювання напівфабрикату проведена оптимізація синтан-танідної композиції. Після завершення процесу наповнювання напівфабрикату наступні сушильно-зволожувальні процеси і операції проводили за технологією виробництва шкір для верху взуття ПрАТ Баришевський шкіряний завод та визначали фізико-хімічні властивості отриманої шкіри.



Рис. 1. Лабораторна установка формування шкіряного матеріалу

При оптимізації складу наповнювальної синтан-танідної композиції для шкіряного напівфабрикату обрано симплексно-решітчастий план експериментів «склад-властивості» [13]. При цьому для встановлення інтервальних обмежень інгредієнтів складу композиції використані результати апріорних досліджень. При постановці експериментів синтезовано *D*-оптимальний план «склад-властивості» синтан-танідної композиції за розробленою програмою, алгоритм якої включає наступні етапи [14]:

1. Встановлення на основі попередніх досліджень граничних обмежень (1) на кожний із факторів x_i, тобто «дозволеної» області факторного простору:

$$0 \le \alpha_i \le x_i \le \beta_i \le 1 \ (i = 1, 2, ..., k), \tag{1}$$

де α_i і β_i – мінімальне та максимальне обмеження складових композиції; k – кількість факторів.

2. Генерування теоретичних «точок-кандидатів» N у «дозволеній» області для плану експерименту з використанням алгоритму Макліна-Андерсона [15] на основі максимального віддалення точок одна від одної та від центра плану.

3. Синтез плану експерименту шляхом відбирання n кращих точок із N «точок-кандидатів» за критерієм *D*-оптимальності (2) шляхом перебору всіх можливих комбінацій точок-кандидатів:

$$\det|D| \to \min, \tag{2}$$

де $D = (F^T F)^{-1}$ – дисперсійна матриця точок-кандидатів поточного плану експерименту; F – матриця плану експерименту X розмірністю $n \times l$; l – кількість коефіцієнтів експериментально-статистичної моделі – математичного опису досліджуваної синтан-танідної композиції; T – операція транспонування матриці.

Для відбору найбільш бажаних експериментальних точок плану n варіантів складу синтан-танідної композиції серед N точок-кандидатів ($n < N$) необхідно перевірити усі можливі комбінації з N по n точок:

$$c_N^n = \frac{N!}{n!(N-n)!}.$$

Для зниження затрат обчислювальних ресурсів при реалізації описаної вище процедури синтезу плану застосовано алгоритм багатопотокових обчислень [16].

Оптимізація складу синтан-танідної композиції виконано з використанням математичного опису процесу моделлю другого порядку Шеффе:

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^{k} b_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^{k} b_{ij} x_i x_j, \tag{3}$$

де $\hat{y}$ – прогнозне значення вихідної змінної; b_i, b_{ij} – коефіцієнти моделі; x_i – хімічні реагенти композиції (i = 1, 2, …, k); i, j – лічильники факторів.

Слід зауважити, що в моделі (3) має зберігатись умова:

$$\sum_{i=1}^{k} x_i = 1. \tag{4}$$

Ефективність впливу хімічних реагентів наповнювальної синтан-танідної композиції на технологічні властивості шкіряного матеріалу оцінювали за математичною моделлю (5), отриманою на основі моделі загального виду (3), для трьохінгредієнтної композиції:

$$\hat{y}_i = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3, \quad (5)$$

де $\hat{y}_i$ – значення технологічного показника отриманого шкіряного матеріалу за прогнозом при i = 1, 2, 3, зокрема: y_1 – об'ємний вихід шкіряного матеріалу, см^3/100 г ГР; y_2 – пористість зразків у ділянці поли, %; y_3 – жорсткість матеріалу, сН; x_1, x_2, x_3 – відносні витрати інгредієнтів наповнювальної композиції, відповідно АКЕА АК, синтан НСК-ДОФС, екстракт мімози / екстракт квебрахо у співвідношенні 3/4.

У подальшому для отримання математичної моделі, яка описувала б технологічні властивості шкіряного напівфабрикату залежно від складу синтан-танідної композиції, синтезували план експерименту за критерієм *D*-оптимальності з накладеними обмеженнями на складові композиції. Після реалізації плану і обробки отриманих експериментальних даних були визначені коефіцієнти моделі та перевірена її адекватність у контрольних точках. Отримана адекватна математична модель «склад-властивості» використана для оптимізації наповнювальної композиції за функцією бажаності Харрінгтона.

На основі апріорних досліджень встановлені граничні обмеження зміни використаних реагентів у складі наповнювальної композиції, мас. частин (табл. 1).

Таблиця 1

Апріорні дані складу синтан-танідної композиції

Реагент композиції	Граничні обмеження* реагентів у композиції	
	α_i	β_i
x_1	0,05	0,2
x_2	0,1	0,4
x_3	0,4	0,8

Для отримання коефіцієнтів моделі (5) за визначеними теоретичними точками-кандидатами (табл. 2) згідно з алгоритмом Макліна-Андерсона [15] і розробленою багатопотоковою програмою синтезовано план експерименту (табл. 3). При цьому за критерієм *D*-оптимальності (2) вибрано з N теоретичних точок кращі n експериментальні точки плану.

Таблиця 2

План експерименту за теоретичними точками-кандидатами

Реагент	Теоретична точка *i*									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_1	0,050	0,200	0,100	0,200	0,050	0,050	0,075	0,200	0,150	0,120
x_2	0,150	0,400	0,100	0,100	0,400	0,275	0,125	0,250	0,100	0,230
x_3	0,800	0,400	0,800	0,700	0,550	0,675	0,800	0,550	0,750	0,650

Таблиця 3

План експерименту в «дозволеній» області симплексу

Реагент	Експериментальна точка *i*					
	1	2	3	4	5	6
x_1	0,05	0,2	0,1	0,2	0,05	0,12
x_2	0,15	0,4	0,1	0,1	0,4	0,23
x_3	0,8	0,4	0,8	0,7	0,55	0,65

Отже, з 10 теоретичних точок, отриманих за методом Макліна-Андерсона і критерієм *D*-оптимальності, для подальших досліджень відібрано шість експериментальних точок. За планом табл. 3 у «дозволеній» області симплексу реалізовані всі позиції плану у довільному порядку. Отримані експериментальні результати впливу складу наповнювальної синтан-танідної композиції на властивості шкіряного матеріалу наведені в табл. 4.

Таблиця 4

Фізико-хімічні властивості наповненого шкіряного матеріалу

Технологічний показник	Експериментальна точка *i*					
	1	2	3	4	5	6
y_1	336	99	229	100	297	270
y_2	56,7	27,9	47,1	28,0	53,6	51,2
y_3	13,9	85,5	29,7	21,0	37,0	25,5

Після реалізації синтезованого у «дозволеній» області симплексу оптимального плану експерименту (табл. 3) в обмеженій його ділянці з урахуванням умови (4) визначаються коефіцієнти моделі (5) за МНК в матричній формі

$$B = (F^T F)^{-1} F^T Y, \tag{6}$$

де B – вектор шуканих коефіцієнтів; Y – колонка значень залежної змінної, які спостерігались у дослідах.

Адекватність моделі (5) перевіряється за співвідношенням (6) у кожній контрольній точці, яка цікава досліднику:

$$t_p = \frac{\left| y_i - \hat{y}_i \right| \sqrt{r}}{s_{експ} \sqrt{1 + \xi}} < t_T \{q; f\}, \tag{6}$$

де t_p – значення критерію Стьюдента розрахункове; $y_i, \hat{y}$ – відповідно експериментальне і розраховане за моделлю значення вихідної змінної в i-контрольній точці; r – кількість точок-кандидатів; $s_{експ} = \sqrt{s^2_{експ}}$, $s^2_{експ} = \frac{1}{z(m-1)} \sum_{i=1}^{z} \sum_{j=1}^{m} (y_{ij} - \overline{y}_i)^2$, $\overline{y}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m} y_{ij}$ – похибка досліду; q – рівень значущості; $f = z \cdot (m - 1)$ – кількість ступенів вільності; z і m – відповідно кількість контрольних точок та паралельних дослідів; $\xi = \overline{f}^T(\overline{x}) D \overline{f}(\overline{x})$ – похибка передбачення вихідної змінної залежно від розташування контрольної точки на симплексі; T – операція транспонування матриці.

$\overline{f}(\overline{x})$ – вектор-функція, що залежить від виду моделі та координат контрольної точки.

Адекватність математичної моделі перевірена за реалізацією по два паралельних досліди у трьох довільно вибраних контрольних точках (табл. 5).

Таблиця 5

Фізико-хімічні властивості наповненого шкіряного матеріалу у контрольних точках складу композиції

Контрольна точка	Склад композиції			Технологічний показник					
	x_1	x_2	x_3	y_1		y_2		y_3	
1	0,077	0,183	0,740	317,0	316,0	57,0	55,0	18,0	19,0
2	0,100	0,200	0,700	289,0	290,0	54,0	57,0	23,0	21,0
3	0,100	0,150	0,750	266,0	268,0	53,0	51,0	22,0	23,0

На основі отриманих результатів фізико-хімічних властивостей шкіряного матеріалу після наповнювання та контрольних експериментів (табл. 4 і 5) розраховано нелінійну математичну модель з трьох залежностей технологічних властивостей шкіряного матеріалу від складу синтан-танідної композиції:

$$\begin{cases} \hat{y}_1 = -589{,}739669x_1 - 1296{,}437563x_2 + 246{,}9589188x_3 + \\ \quad +2440{,}442733x_1x_2 - 641{,}7057007x_1x_3 + 3082{,}148433x_2x_3; \\ \hat{y}_2 = -518{,}6552335x_1 - 108{,}5801115x_2 + 42{,}55449965x_3 + \\ \quad 819{,}1247988x_1x_2 + 533{,}0268399x_1x_3 + 311{,}4861313x_1x_2; \\ \hat{y}_3 = -1139{,}353752x_1 + 509{,}7423927x_2 + 49{,}16278061x_3 + \\ \quad 1600{,}22206x_1x_2 + 1411{,}370181x_1x_3 - 944{,}4814545x_2x_3 \end{cases} \tag{7}$$

Адекватність отриманих залежностей математичної моделі (7) «склад синтан-танідної композиції – властивості шкіряного матеріалу» перевірена у контрольних точках (табл. 6).

Отже, з отриманих даних видно, що розрахована математична модель, що описує склад синтан-танідної композиції, також адекватно описує й властивості наповненого шкіряного матеріалу. Отримана математична модель може бути використана для оптимізації інгредієнтного складу наповнювальної композиції при формуванні еластичного шкіряного матеріалу.

Для оптимізації складу синтан-танідної композиції $\overline{x} = \|x_1, x_2, x_3\|$, що характеризується трьома вихідними технологічними показниками отриманої математичної моделі, застосована функція бажаності [13] виду:

$$D_f = \sqrt[3]{d_1 d_2 d_3}, \tag{8}$$

де d_i (i = 1, 2, 3) – часткова функція бажаності технологічного показника y_i, визначається за залежністю:

$$d_i = \exp[-\exp(-y_i')], \tag{9}$$

$y_i' = b_0^{(i)} + b_1^{(i)} y_i$ – безрозмірне значення технологічного показника y_i;

Таблиця 6

Результати перевірки адекватності математичної моделі

Контрольна точка	$\hat{y}_i$	ξ	$\overline{y}_i$	$\left\|\overline{y}_i - \hat{y}_i\right\|$	t_p	**Адекватність** $y = f(x)$
Об'ємний вихід шкіряного матеріалу						
1	315,3	0,531	316,5	1,2	1,940	Так
2	290,0	0,697	289,5	0,5	0,768	Так
3	267,0	0,463	267,0	0,0	0,000	Так
Пористість зразків у ділянці поли						
1	55,8	0,531	56,0	0,2	0,212	Так
2	53,5	0,697	55,5	2,0	1,816	Так
3	51,1	0,463	52,0	0,9	0,914	Так
Жорсткість матеріалу						
1	17,0	0,531	18,5	1,5	2,425	Так
2	21,0	0,697	22,0	1,0	1,535	Так
3	23,0	0,463	22,5	0,5	0,827	Так

коефіцієнти $b_0^{(i)}, b_1^{(i)}$ визначають із систем рівнянь:

$$\begin{cases} y_i'^{\text{гірше}} = b_0^{(i)} + b_1^{(i)} y_i^{\text{гірше}} \\ y'^{\text{краще}} = b_0^{(i)} + b_1^{(i)} y_i^{\text{краще}} \end{cases}, \quad (i = 1, 2, 3),$$

$y_i^{\text{гірше}}, y_i^{\text{краще}}$ – відповідно гірше і краще значення критерію y_i, що встановлюються дослідником і з технологічних міркувань не може бути зменшеним чи збільшеним;

$y_i'^{\text{гірше}}, y_i'^{\text{краще}}$ – відповідно гірше і краще значення безрозмірного критерію якості, що визначаються на підставі залежності (9) за формулами:

$$y_i'^{\text{гірше}} = -\ln(-\ln d_{\text{гірше}}), \quad y_i'^{\text{краще}} = -\ln(-\ln d_{\text{краще}}),$$

$d_{\text{гірше}}$ і $d_{\text{краще}}$ – гірше і краще показники часткових функцій бажаності (8), які відповідно приймають значення 0,2 і 0,8.

При максимальному значенні функції бажаності D_f технологічні показники y_i (i = 1, 2, 3) набувають найкращого компромісного значення, що відповідають оптимальному складу $\overline{x}^{opt}$ синтан-танідної композиції.

Отже, на основі функції бажаності встановлюється оптимальний склад наповнювальної синтан-танідної композиції, що характеризується трьома найкращими технологічними показниками.

Отримані рівняння математичної моделі використані для багатокритеріального пошуку оптимального складу наповнювальної композиції за допомогою узагальненої функції бажаності, що складена за отриманими рівняннями математичної моделі в x-координатах при обмеженнях на вихідні змінні, які відповідають найгіршому і найкращому значенням: y_1 – 160 і 240, y_2 – 48 і 60, y_3 – 33 і 20. За методом сканування [14] з кроком 0,01 отримано оптимальний склад композиції, мас. частин: x_1 = 0,06, x_2 = 0,24, x_3 = 0,70. При цьому вихідні змінні набувають значень: y_1 = 352,3 см^3/100 г ГР, y_2 = 59,1 %, y_3 = 12,0 сН при функції бажаності D_f = 0,89.

Отже, для наповнювання 100 кг додубленого напівфабрикату необхідно взяти, кг: алкілкарбоксиетаноламінів аліфатичних кислот C_{7-9} – 0,6; синтану нафтолсульфокислоти, діоксідіфенілсульфона з формальдегідом – 2,4; екстрактів мімози і квебрахо 7,0. При цьому з врахуванням вмісту в безфенольному синтані дубильних речовин і танідів у екстрактах мімози та квебрахо, їх витрати щодо маси напівфабрикату відповідно становлять, мас. %: 1,5; 2,45 і 3,22.

Для апробації оптимізованого складу синтан-танідної композиції в лабораторних умовах кафедри біотехнології, шкіри та хутра КНУТД використали зразки розміром 400×400 мм з ділянок поли і чепрака ялівки середньої, що була використана при оптимізації композиції. Властивості отриманої шкіри наведені в табл. 7. При цьому контрольною технологією була діюча на підприємстві ПрАТ Баришевський шкіряний завод.

Як свідчать наведені дані, шкіряний матеріал отриманий за розробленою технологією переважає отриманий за діючою технологією за об'ємним виходом, пористістю та зниженням жорсткості відповідно на 36,6 см^3/100 г ГР, 6,6 % і 3,6 сН. Водночас, слід відзначити, що розроблена технологія передбачає виключення таких шкідливих реагентів як фенол- і формальдегідвмісних синтанів: Syntan AM-656, Syntan LF187, Syntan GP, що складають 10 % маси напівфабрикату та використовуються у діючій технології. Отже, розроблена технологія наповнювання шкіряного напівфабрикату з використанням оптимального складу синтан-танідної композиції забезпечує отримання еластичного шкіряного матеріалу з високими технологічними властивостями.

Таблиця 7

Фізико-хімічні властивості шкіряного матеріалу

Показник шкіряного матеріалу	Синтан-танідна композиція технології	
	розробленої	діючої
Товщина шкіри, мм	1,3	1,3
Об'ємний вихід, $см^3$/100 г ГР	349,0	312,2
Пористість зразків у ділянці поли, % Жорсткість матеріалу, сН	59,0 15,0	52,4 18,6

Висновки

Розроблено оптимальний склад синтан-танідної наповнювальної композиції для формування еластичного шкіряного матеріалу з використанням математичного моделювання. В процесі багатокритеріальної оптимізації складу наповнювальної композиції проведено апріорний експеримент. Синтезовано і реалізовано план експерименту з використанням алгоритму Макліна-Андерсона і розробленої програми обчислення потоками D-оптимального плану та отримана математична модель складу наповнювальної синтан-танідної композиції. На основі функції бажаності Харрінгтона встановлено оптимальні витрати інгредієнтів наповнювальної композиції та властивості отриманого напівфабрикату.

Встановлено оптимальний склад синтан-танідної композиції, мас. %: алкілкарбоксиетаноламіни аліфатичних кислот $C_{7–9}$ – 7,7, синтан нафтолсульфокислоти, діоксідіфенілсульфона з формальдегідом – 19,3, екстракт мімози – 31,5, екстракт квебрахо – 41,5. Це дозволяє скоротити витрати природних танідів на 19,0 %, формувати шкіряний матеріал з підвищеними об'ємним виходом, пористістю, зниженою жорсткістю відповідно на 11,8, 12,6 та 24,0 % порівняно з діючою технологією. Розроблена технологія наповнювання шкіряного напівфабрикату з використанням безфенольного синтану і алкілкарбоксиетаноламінів аліфатичних кислот $C_{7–9}$ може бути рекомендована для виготовлення шкіряних матеріалів з інших видів сировини.

Список використаної літератури

1. Covington A. D., Wise W. R. Tanning Chemistry: The Science of Leather. 2nd ed. Royal Society of Chemistry. London, 2019. P. 554–571.

2. Заєць А., Андреєва, О. Традиційні підходи і новітні розробки в області рідинного оздоблення натуральної шкіри. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. № 323(4). С. 131–138.

3. Fordzyun Yu., Andreyeva O., Maistrenko L. Level of comfort: artificial and natural shoe materials. A comprehensive assessment. *Key Engineering Materials*. 2013. Vol. 559. P. 25–30.

4. Gürler Karaman D., Gülümser G. Possibilities of usage of alkali aluminosilicates as tanning material in chromium-free leather production. *JTATK*. 2016. Vol. 26, № 1. P. 117–124.

5. Kanth S. V., Kannan P. R., Usharani N. et al. Studies on the use of enzymes in tanning process. Part 2: kinetics of vegetable tanning process. *JALCA*. 2010. Vol. 105. P. 16–24.

6. Kanth S. V., Kannan P. R., Usharani N. et al. Studies on the use of enzymes in tanning process. Part 1: high exhaust vegetable tanning. *JALCA*. 2009. Vol. 104. P. 405–415.

7. A. D`Aquino, N. Barbani, G. D`Elia et al. Combined organic tanning based on mimosa and oxazolidine: development of a semi-industrial scale process for high-qualiti bovine upper leather. *SLTC*. 2013. Vol. 1, N 1. P. 9–15.

8. Іванов С. В., Трачевський В. В., Гетьманчук Ю. П., Мокринська О. В., Грушак З. В. Оптимізація складу полімерних композицій методом математичного планування. *Вісник НАУ*. 2006. № 4. Р. 199–201.

9. Кондратюк О. В., Касьян Е. Є. Застосування препарату ЕПАА-2 у покривному фарбуванні шкіряного напівфабрикату. *Сучасне матеріалознавство та товарознавство: теорія, практика, освіта* : матеріали II Міжн.наук.-практ. Інтернет-конф. (м. Полтава, 25–26 березня 2015 року), 2015. С. 186–189.

10. Сапронов О. О. Оптимізація складу захисних покриттів для елементів суднових енергетичних установок методом математичного планування експерименту. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*, 2014, № 1. С. 237–248.

11. Zaiets A., Andreyeva O. Determination of rational parameters of liquid finishing of leather semi-finished product using acrylic polymer and modified fats. *Tekstilna industrija*. 2024. Vol. 72, № 3. P. 11–20.

12. Данилкович А. Г. Практикум з хімії і технології шкіри та хутра : навч. посіб. Київ : Фенікс. 2006. 340 с.

13. Cornell J. A. Experiments with mixtures: Designs, models, and the analysis of mixture data. 3rd ed. New York : Wiley, 2002. https://doi.org/10.1002/9781118204221.fmatter

14. Danylkovych A. H., Korotych O. I. Optimization of Leather Filling Composition Containing SiO_2 Nanoparticles. *JALCA*. 2019. Vol. 114. P. 333–343.

15. Anderson V. L., McLean R. A. *Design of experiments: a realistic approach*, Marcel Dekker, New York, Basel, Hong Kong, 1974. p. 440.

16. Langguth J., Azad A., Halappanavar M., Manne F. On parallel push–relabel based algorithms for bipartite maximum matching. *Parallel Computingm*, 2014. Vol. 40(7). P. 289–308.

References

1. Covington, A. D., Wise, W. R. (2019). Tanning Chemistry: The Science of Leather. 2nd ed. Royal Society of Chemistry, London, 554–571. https://doi.org/10.1039/9781839168826

2. Zaiets, A., Andreyeva, O. (2023). Traditional approaches and the latest developments in the fi eld of liquid fi nishing of natural leather. *Herald of Khmelnytskyi National University*, 323 (4), 131–138. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-323-4-131-137

3. Fordzyun, Yu, Andreyeva, O., Maistrenko, L. (2013). Level of comfort: artificial and natural shoe materials. *A comprehensive assessment. Key Engineering Materials*, 559, 25–30. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.559.25

4. Gürler Karaman, D., Gülümser, G. (2016). Possibilities of usage of alkali aluminosilicates as tanning material in chromium-free leather production. *JTATK*, 26, 117–124.

5. Kanth, S. V., Kannan, P. R., Usharani, N., et al. (2010). Studies on the use of enzymes in tanning process. Part 2: kinetics of vegetable tanning process. *JALCA*, 105, 16–24.

6. Kanth, S. V., Kannan, P. R., Usharani, N., et al. (2009). Studies on the use of enzymes in tanning process. Part 1: high exhaust vegetable tanning. *JALCA*, 104, 405–415.

7. D`Aquino, A., Barbani, N., D`Elia, G., et al. (2013). Combined organic tanning based on mimosa and oxazolidine: development of a semi-industrial scale process for high-qualiti bovine upper leather. *SLTC*, 1, N 1, 9–15.

8. Ivanov, S. V., Trachevskyy, V. V., Hetmanchuk, Iu. P., Mokrynska, O. V., Hrushak, Z. V. (2006). Optimizatsia skladu polimernych kompozytsiy metodom matematicheskogo planirovaniia. *Visnyk NAU*, 4, 199–201. [in Ukrainian].

9. Kondratiuk, O. V., Kasian, E. E. (2015). Zastosuvannia preparatu EPAA-2 u pokryvnomu farbuvanni shkirianoho napivfabrykatu. *Suchasne materialoznavstvo ta tovaroznavstvo: teoriia, praktyka, osvita* : Materialy II mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii (Poltava, 25–26 bereznia 2015 roku), 186–189. [in Ukrainian].

10. Sapronov, O. O. (2014). Optymizatsiia skladu zakhysnykh pokryttiv dlia elementiv sudnovykh enerhetychnykh ustanovok metodom matematychnoho planuvannia eksperymentu. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*, 1, 237–248. [in Ukrainian].

11. Zaiets, A., Andreyeva, O. (2024). Determination of rational parameters of liquid finishing of leather semi-finished product using acrylic polymer and modified fats. *Tekstilna industrija*, 72, 3, 11–20. DOI: 10.5937/tekstind2403011Z

12. Danylkovych, A. H. (2006). Praktykum z khimii i tekhnolohii shkiry ta khutra : navch. posibnyk, Kyiv : Feniks. [in Ukrainian].

13. Cornell, J. A. (2002). Experiments with mixtures: Designs, models, and the analysis of mixture data. 3rd ed. New York : Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118204221.fmatter

14. Danylkovych, A. H., Korotych, O. I. (2019). Optimization of Leather Filling Composition Containing SiO_2 Nanoparticles. USA: *JALCA*, 114, 333–343.

15. Anderson, V. L., McLean, R. A. (1974). Design of experiments: a realistic approach, Marcel Dekker, New York, Basel, Hong Kong.

16. Langguth, J., Azad, A., Halappanavar, M., Manne, F. (2014). On parallel push–relabel based algorithms for bipartite maximum matching. *Parallel Computingm*, 40(7), 289–308. DOI:10.1016/j.parco.2014.03.004

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 22.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 681.5:004.94 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.9

А. О. ДЕРКАЧЕНКО
аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-0443-0329

О. В. ПОЛИВОДА
кандидат технічних наук,
доцент кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-6323-3739

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ПЛАТФОРМИ СФЕРИЧНОГО ПАРАЛЕЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ В 3D-ПРОСТОРІ ТА ЙОГО ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ

У статті розглянуто питання математичного моделювання та програмної реалізації алгоритмів для сферичних паралельних механізмів (СПМ), які завдяки високій точності та жорсткості знаходять широке застосування у сучасній інженерії. Проаналізовано можливості використання СПМ у тренажерних системах, робототехніці, медичному обладнанні та системах стабілізації. Визначено, що ключовим завданням є не лише відтворення орієнтації платформи у просторі, але й побудова математичного апарату для визначення відносних кутів переміщення та безпосередніх керуючих сигналів для серво двигунів.

Запропоновано метод розрахунку координат рухомої платформи на основі матричних перетворень, який дозволяє точно враховувати повороти відносно осей X, Y, Z. Окрему увагу приділено задачі визначення координат проміжних опорних точок механізму, що лежать на колі в площині XY. Сформульовано систему геометричних та кінематичних рівнянь, розв'язання якої породжує множину можливих координат положень ланок механізму. Для відбору єдиного фізично коректного рішення розроблено багатокроковий алгоритм фільтрації, що включає перевірку належності точок колу, дотримання мінімальних відстаней між ланками, відсутність перетину та вибір найближчої до попереднього стану комбінації координат.

У роботі запропоновано метод визначення відносних кутів переміщення середніх точок, яка дає змогу оцінювати як напрямок, так і величину їх зміщення. Це дозволяє перейти від умовних поворотів платформи до обчислення кутів повороту серво двигунів, які виступають безпосередніми керуючими впливами. На основі розробленого алгоритму реалізовано програмний модуль мовою Python із використанням бібліотек NumPy та Matplotlib, що забезпечує як чисельні розрахунки, так і дво- та тривимірну візуалізацію роботи механізму.

Отримані результати підтвердили адекватність математичної моделі та її придатність для інтеграції у системи автоматизованого керування. Запропонований підхід забезпечує точне відстеження положення платформи, обчислення відносних кутів та визначення сигналів для серво двигунів. Це відкриває перспективи практичного застосування у робототехнічних комплексах, системах стабілізації, тренажерах та медичних пристроях, де особливо важливі висока точність, надійність та безперервність керування.

Ключові слова: *робототехнічні системи, сферичний паралельний механізм, алгоритм керування рухом, програмна реалізація, планування траєкторії, зворотна задача кінематики, комп'ютерне моделювання.*

A. O. DERKACHENKO
Postgraduate Student at the Automation, Robotics
and Mechatronics Department
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-0443-0329

O. V. POLYVODA
Candidate of Sciences in Technology,
Associate Professor at the Automation, Robotics
and Mechatronics Department
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-6323-3739

© Деркаченко А. О., Поливода О. В., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR DETERMINING THE POSITION OF A SPHERICAL PARALLEL MECHANISM PLATFORM IN 3D SPACE AND ITS SOFTWARE IMPLEMENTATION

The paper addresses the problem of mathematical modeling and software implementation of algorithms for spherical parallel mechanisms (SPM), which are widely used in modern engineering due to their high rigidity and accuracy. Potential applications of SPM include training simulators, robotic manipulators, medical equipment, and stabilization systems. It is shown that the key task is not only to reproduce the spatial orientation of the moving platform but also to develop a mathematical framework for determining relative angular displacements and direct control signals for servo drives.

The method is proposed for calculating the coordinates of the moving platform based on rotation matrices, which allows precise consideration of rotations relative to the X, Y, and Z axes. Special attention is given to determining the coordinates of the intermediate reference of the mechanism located at the circle in the XY-plane. The system of geometric and kinematic equations is formulated, the solution of which yields multiple possible coordinates of the mechanism links positions. To select the only physically feasible solution, a multi-step filtering algorithm has been developed, including circle-membership verification, minimum distance checks, link intersection analysis, and the choice of the coordinates configuration closest to the previous state.

The study introduces a method for determining the relative angular displacements of the intermediate points, enabling the estimation of both direction and magnitude of their shifts. This provides a transition from the platform's conditional rotations to the computation of servo drive rotation angles, which act as direct control signals. Based on the developed algorithm, a software module was implemented in Python using NumPy and Matplotlib libraries, enabling both numerical calculations and two- and three-dimensional visualization of the mechanism's operation.

The results obtained confirm the adequacy of the mathematical model and its suitability for integration into automated control systems. The proposed approach ensures accurate tracking of platform position, determination of relative angles, and calculation of control signals for servo drive. This makes the method applicable in robotic systems, stabilization systems, training simulators, and medical devices, where high precision, reliability, and continuous control are crucial.

Key words: *robotic systems, spherical parallel mechanism, motion control algorithm, software implementation, trajectory planning, inverse kinematics problem, computer modeling.*

Постановка проблеми

Просторові платформи (механізми) побудовані за принципом сферичних паралельних механізмів (СПМ) належать до класу паралельних кінематичних структур, що завдяки високій жорсткості та точності широко застосовуються у сучасній інженерії. Їх застосування охоплює надзвичайно широкий спектр завдань: від авіаційних і космічних тренажерів, які потребують реалістичного відтворення рухів у просторі, до робототехнічних маніпуляторів, що виконують високоточні операції у промисловості, зокрема при автоматизованому складанні, зварюванні та роботі з крихкими матеріалами. Завдяки особливостям геометричної структури такі маніпулятори поєднують компактність із підвищеною вантажопідйомністю та забезпечують узгоджені рухи з кількома ступенями свободи – критично важливу властивість для сучасних виробничих процесів. Важливе місце СПМ посідають і в системах стабілізації, де необхідно компенсувати зовнішні коливання та збурення: у стабілізаторах для камер, у платформах віртуальної реальності, а також у морських та авіаційних комплексах. У таких умовах вони забезпечують високу швидкодію, точність і плавність рухів при мінімальних затримках. Окремо варто відзначити медичні системи, де такі механізми дозволяють реалізувати складні, але контрольовані рухи з високою точністю, що є критичним фактором у хірургії та діагностиці.

Для повного вирішення задач ідентифікації параметрів руху елементів каркасних конструкцій необхідно визначати параметри, що безпосередньо можуть бути передані на виконавчі органи системи, а саме на серво двигуни. Окрім визначення координат точок платформи та середньої ланки потрібно також, обчислити відносні кути переміщення та розрахувати кути повороту серво двигунів що і є основним завданням цього дослідження. Розв'язок цієї задачі відкриває шлях до створення замкненої системи керування механізмом, де кожен етап – від вхідних даних до керуючих сигналів – має чітке математичне та алгоритмічне обґрунтування.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка алгоритму визначення координат точок і кутів повороту платформи та його реалізація у вигляді програмного продукту мовою програмування Python з використанням засобів візуалізації руху платформи у 2D- та 3D-просторі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для опису положення рухомої платформи прийнято використовувати три кути повороту відносно координатних осей: α (навколо осі X), β (навколо осі Y), γ (навколо осі Z), які є параметрами математичної моделі зворотної динаміки руху елементів СПМ. На основі них обчислюються координати трьох характерних точок платформи – C, $C2$, $C3$, що утворюють жорсткий трикутник у просторі. Визначення цих координат реалізовано через матричні перетворення та представлено у роботі [1].

Рішення задачі визначення координат точок середньої ланки – B, $B2$, $B3$, що лежать на колі у площині XY ($z = 0$), виконується із застосуванням методу аналітичної геометрії [2–4] і було представлене в роботі [5, 6]. Методи представлені в роботах [1, 5, 6] дають повний набір просторових координат як для рухомої платформи, так і проміжних опорних точок. На рисунку 1 наведено схему розташування опорних точок кола основи (B, $B2$, $B3$) та координат платформи (трикутник з вершинами C, $C2$, $C3$).

Рухома платформа розглядуваного механізму визначається трьома характерними точками C, $C2$, $C3$, які задають її положення у тривимірному просторі відносно декартової системи координат (x, y, z). У початковому положенні координати цих точок мають вигляд: $C(x_C, y_C, z_C)$, $C2(x_{C2}, y_{C2}, z_{C2})$, $C3(x_{C3}, y_{C3}, z_{C3})$.

Фактично трикутник, утворений цими точками, визначає площину платформи, а також дозволяє однозначно відстежувати її орієнтацію у просторі.

Опорні точки основи механізму – B, $B2$, $B3$ – розташовані у площині XY. Вони утворюють коло з радіусом R та центром у початку координат, що відображається у рівняннях: $B(x_B, y_B, 0)$, $B2(x_{B2}, y_{B2}, 0)$, $B3(x_{B3}, y_{B3}, 0)$.

Таким чином, основа задає геометричні обмеження для платформи, а її положення у просторі визначається взаємодією точок C і B, $C2$ і $B2$, $C3$ і $B3$.

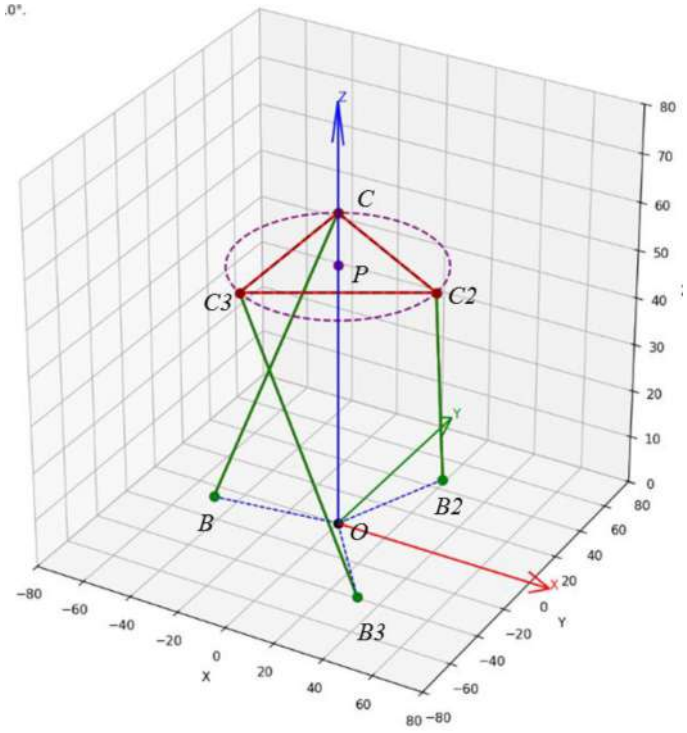


Рис. 1. Схема платформи у початковому положенні

Поточне положення рухомої платформи відносно початкового визначається трьома кутами повороту навколо координатних осей: α – поворот навколо осі X, β – поворот навколо осі Y, γ – поворот навколо осі Z.

Ці кути належать до вхідних параметрів системи і визначають, як саме початкові координати точок C, $C2$, $C3$ будуть перетворені у нове положення.

Перехід від початкових координат до поточних здійснюється за допомогою матриць повороту. Для кожної з осей вони мають вигляд:

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix}, \quad R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix}, \quad R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & \sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{bmatrix}, \tag{1}$$

де $R_x(\alpha)$ – це матриця повороту навколо осі X, $R_y(\beta)$ – це матриця повороту навколо осі Y, $R_z(\gamma)$ – це матриця повороту навколо осі Z.

Загальна матриця повороту R визначається як добуток трьох матриць:

$$R = R_x(\alpha) \cdot R_y(\beta) \cdot R_z(\gamma). \tag{2}$$

Тоді нові координати будь-якої точки платформи C_i^{new} можна обчислити за формулою:

$$C_i^{new} = R \cdot C_i^{old}, \tag{3}$$

де C_i^{old} – це матриця значень останніх попередніх координат відповідних точок платформи, i – номер відповідної точки платформи.

На рисунку 2 наведено приклад послідовного застосування матричного перетворення до координат точок платформи.

Цей підхід забезпечує коректне врахування орієнтації платформи у просторі та дозволяє однозначно відтворити її положення після довільних обертів.

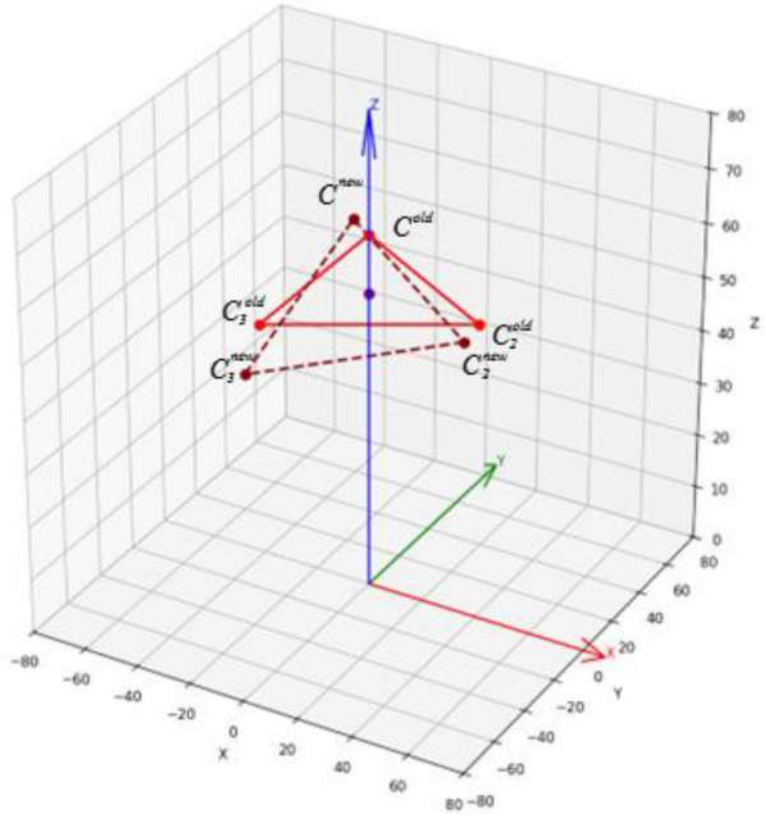


Рис. 2. Результат послідовного застосування матриць R_x, R_y, R_z до точок платформи

Завдяки використанню апарату матриць обертання задача зводиться до послідовного застосування лінійних перетворень, що зручно як для аналітичних досліджень, так і для програмної реалізації. Проте для остаточного формулювання моделі динаміки руху СПМ необхідно враховувати обмеження на координати точок основи та розробити алгоритм визначення відносних кутів переміщення, що безпосередньо пов'язані з роботою серво двигунів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Розглянемо математичну модель визначення координат середніх точок механізму типу СПМ.

Робоча платформа механізму описується трьома точками C, $C2$, $C3$ в системі координат XYZ, тоді як шарніри середньої ланки (точки B, $B2$, $B3$) обмежені площиною XY. Це означає, що їх координати мають вигляд (x, y), а значення z завжди дорівнює нулю.

Необхідно знайти таке положення точок B, $B2$, $B3$, яке б одночасно задовольняло двом ключовим обмеженням.

Геометричне обмеження: усі точки В лежать на колі з радіусом R_1 та центром у початку координат $O(0,0)$, що можна записати у вигляді рівняння:

$$x_B^2 + y_B^2 = R_1^2. \tag{4}$$

Кінематичне обмеження: відстань між відповідними точками C та B дорівнює довжині ланки механізму R_c, що в координатній формі виражається як:

$$(x_C - x_B)^2 + (y_C - y_B)^2 + (z_C)^2 = R_c^2. \tag{5}$$

Аналогічні системи рівнянь формуються і для пар: $C2$ і $B2$ та $C3$ і $B3$.

Таким чином, задача зводиться до розв'язання трьох систем нелінійних рівнянь, кожна з яких може мати до чотирьох можливих розв'язків, що вимагає розгляду двох додаткових задач:

1. Визначення відносних кутів переміщення точок середньої ланки (B, $B2$, $B3$), які характеризують зміну положення точок при переході від попереднього стану до прогнозованого, наступного та дають можливість відстежувати не лише абсолютні координати, але й напрямок та величину зміщення кожної точки по колу основи. Таким чином, відносні кути дають можливість за геометричними параметрами механізму досліджувати його реальну динаміку.

2. Обчислення кутів повороту серво двигунів (a, $a2$, $a3$), що є ключовою задачею, оскільки саме ці кути є безпосередніми керуючими впливами, які подаються на виконавчі пристрої. Правильність їх визначення істотно впливає на точність руху платформи, стабільність роботи системи та її відповідність заданій траєкторії. Від обчислення кутів повороту (a, $a2$, $a3$) залежить можливість коректного перетворення умовних поворотів платформи (α, β, γ) у фізично реалізовані положення серво двигунів.

Через надлишковість отриманих рішень виникає потреба у відборі єдиної фізично допустимої конфігурації механізму, що реалізується у багатокроковому алгоритмі фільтрації.

На першому етапі здійснюється відбір точок, що належать колу з радіусом R_1 (з урахуванням допустимої похибки ε). Для цього покроково аналізуються всі можливі комбінації координат (x, y) точок B, $B2$, $B3$. Обчислюється евклідова норма відповідного вектора, після чого визначається різниця між цією величиною та радіусом R_1. Якщо модуль різниці не перевищує ε, точка вважається такою, що задовольняє умові належності колу. На цьому етапі для кожної з точок B, $B2$, $B3$ може існувати кілька допустимих варіантів. З отриманих варіантів формується множина всіх можливих комбінацій, що надалі підлягають подальшій фільтрації. Результати виконання першого етапу, а саме можливі положення точок, які задовольняють геометричному обмеженню $x_B^2 + y_B^2 = R_1^2$ наведено на рисунку 3.

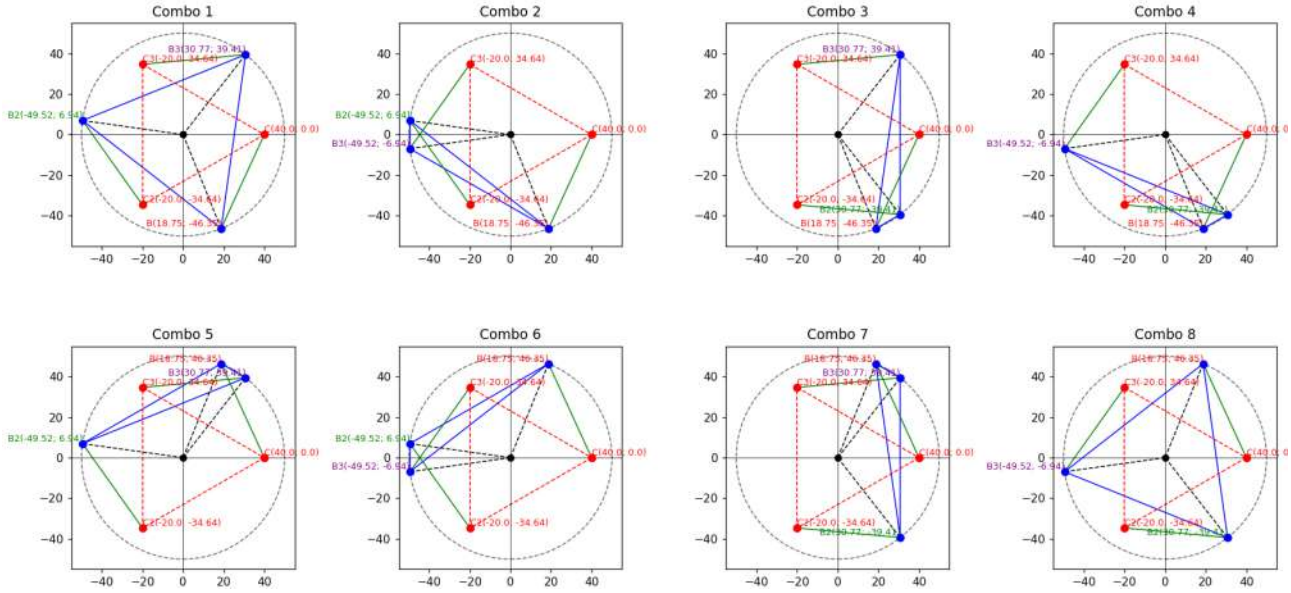


Рис. 3. Визначення множини кандидатів точок B, $B2$, $B3$ шляхом перевірки належності колу радіуса R_1

Другий етап включає два послідовні кроки перевірки, спрямовані на забезпечення виконання фізичних обмежень механізму: перевірка мінімальної відстані між можливими положеннями точок та перевірка на відсутність перетину ланок.

Для уникнення вироджених конфігурацій виконується аналіз попарних відстаней між усіма кандидатами точок B, $B2$, $B3$. Якщо будь-яка з відстаней виявляється меншою за встановлену граничну величину $d_{\min}$, така комбінація відкидається як некоректна. Ця умова відображає фізичне обмеження механізму, пов'язане з мінімально допустимою шириною з'єднувальної ланки. Результати процедури відсіювання комбінацій, у яких відстань між точками B, $B2$, $B3$ є меншою за допустиме значення, що відповідає фізичним обмеженням механізму наведено на рисунку 4.

Аналіз орієнтації векторів, що описують з'єднання між точками B і C дозволяє виявити потенційні випадки перетину ланок, що є фізично неможливими у реальній роботі механізму. Всі конфігурації, для яких зафіксовано перетин, відсіюються з подальшого розгляду. Результати цієї перевірки, а саме відсіювання конфігурацій, у яких зафіксовано перетин відрізків B і C, $B2$ і $C2$, $B3$ і $C3$, як таких, що є фізично неможливими наведено на рисунку 5.

Остаточний етап здійснюється за критерієм найбільшої близькості до попереднього положення системи, що забезпечує плавність і безперервність руху.

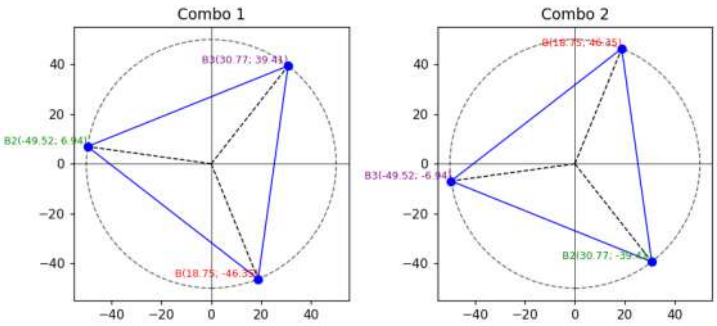


Рис. 4. Результат фільтрації множини кандидатів на основі критерію мінімальної відстані d_{min}

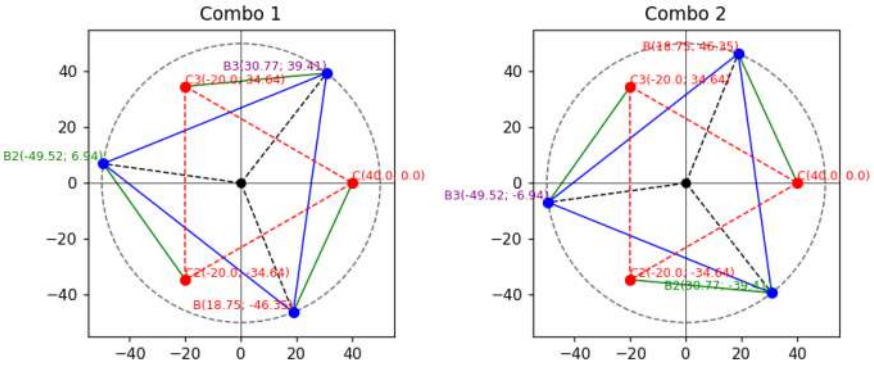


Рис. 5. Результат перевірки на відсутність перетину ланок за допомогою аналізу орієнтації векторів

Таке послідовне виконання процедур дало можливість зменшити кількість комбінацій до одного варіанту, що забезпечує коректне та стабільне керування виконавчими органами системи.

Програмна реалізація алгоритму побудована на мові Python та бібліотек NumPy [7] і matplotlib [8]. Архітектура передбачає створення класу GetAngles, що інкапсулює основну функціональність.

Основні кроки реалізації алгоритму:

1. Завантаження та оновлення конфігураційних даних включає в себе зберігання координат точок платформи (*C*, *C*2, *C*3), середніх ланок (*B*, *B*2, *B*3), а також кути (α, β, γ та *a*, *a*2, *a*3). Дані поділені на «*zero*» (початкові значення), «*last*» (останній стан) та «*all*» (історія змін).

2. Обчислення нових координат платформи відбувається за допомогою матриць повороту навколо осей *X*, *Y*, *Z* згідно рівнянь (1, 2). Таким чином, для будь-якої точки *C* платформи застосовується перетворення (3).

3. Генерація та відбір точок *B*, *B*2, *B*3 відбувається з використанням функції *get_m_cords*, що реалізує розв'язання системи (4, 5).На виході маємо до чотирьох кандидатів для кожної точки. Для подальшого відсіювання вироджених точок використовуються процедури:

```
filter_points_on_circle – перевіряє належність точок колу;
   def filter_points_on_circle(self, points, r, eps=1e-6):
      valid_points = []
      for x, y in points:
         if abs(x**2 + y**2 - r**2) < eps:
            rounded = (round(float(x), 8), round(float(y), 8))
            if rounded not in valid_points:
               valid_points.append(rounded)
      return valid_points

filter_valid_combinations – відкидає дублікати та точки, що надто близько одна до одної;
   def filter_valid_combinations(self, B, B2, B3, min_dist=10.0):
      valid_combinations = []
      for combo in itertools.product(B, B2, B3):
         if (x2 - x1)**2 + (y2 - y1)**2 <= min_dist**2:
            valid_combinations.append(combo)
      return valid_combinations
```

```
is_valid_combo – перевіряє, щоб відрізки B–C, B2–C2, B3–C3 не перетиналися.
   def segments_intersect(self, p1, p2, q1, q2):
      def orient(a, b, c): return (b[0]-a[0])*(c[1]-a[1]) - (b[1]-a[1])*(c[0]-a[0])
      return orient(p1, p2, q1) * orient(p1, p2, q2) < 0
   def is_valid_combo(self, B, B2, B3, C, C2, C3):
      segments = [(B, C), (B2, C2), (B3, C3)]
         if self.segments_intersect(...): return False
      return True
```

4. Вибір оптимальної комбінації виконується з використанням функції *choose_closest_combo*, яка виконує пошук комбінації, що мінімізує сумарну відстань до попередніх *last* координат. Що може бути аналітично виражено як:

$$combo^* = \arg\min_{combo} \sum_{i=1}^{3} \left\| B_i - B_i^{last} \right\|. \tag{6}$$

Або у вигляді програмного коду:

```
def choose_closest_combo(self, combos, last_coords):
   def dist(a, b): return np.linalg.norm(np.array(a) - np.array(b))
   best_combo = min(combos, key=lambda combo: sum(dist(c, l) for c, l in zip(combo, last_
coords)), default=None)
   return best_combo
```

5. Для кожної пари (B^{last}, B^{new}) формується вектор зміщення та обчислюється кут повороту за формулою:

$$\theta = \arcsin\sin\frac{(|v|)}{R1}, \tag{7}$$

де v – вектор зміщення.

В результаті отримуємо кути a, $a2$, $a3$.

6. Візуалізація результатів для 2D та 3D варіантів відбувається на допомогою таких функцій:

– *plot_combinations* – відображення можливих варіантів точок у 2D. Результат 2D візуалізації наведені на рисунку 6, де схематично зображено точки C та варіанти точок B на колі;

– *plot_mechanism_3d* – побудова повної 3D-моделі з урахуванням платформи, точок B, $B2$, $B3$, центру O та кола навколо точки P наведена на рисунку 7, де платформа зображена у вигляді трикутника C, $C2$, $C3$, точки B, $B2$, $B3$ у площині XY.

Висновки

У ході дослідження було вдосконалено математичну модель динаміки руху елементів механізму та розроблено програмний алгоритм для визначення координат і кутів повороту для механізмів типу СПМ. Отримані результати демонструють, що запропонований підхід дозволяє ефективно поєднати математичний апарат з практичними методами комп'ютерного моделювання.

По-перше, забезпечено коректне відстеження положення рухомої платформи, що дає змогу не лише визначати її просторову орієнтацію, але й аналізувати динаміку змін у процесі руху. Це відкриває можливості для точного моделювання сценаріїв роботи механізму у різних умовах.

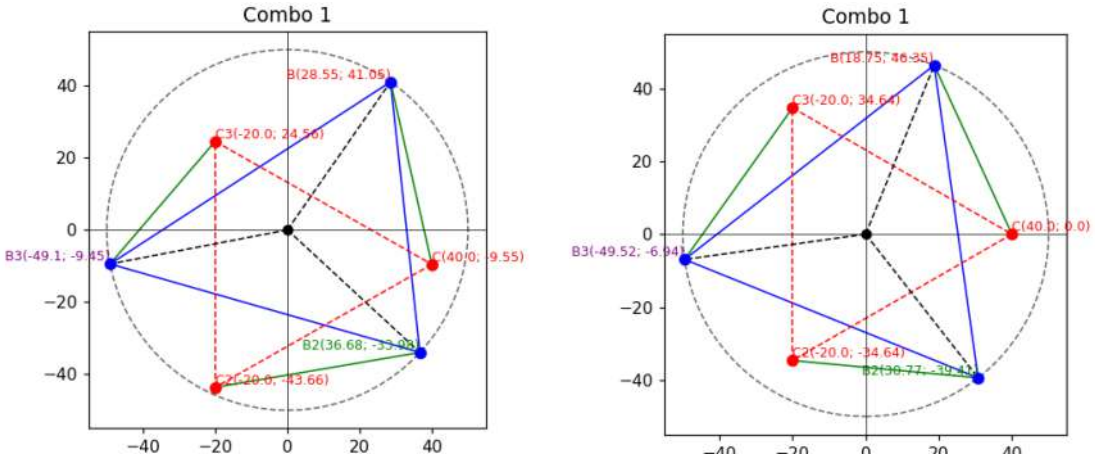


Рис. 6. Приклад 2D візуалізації можливих точок B, $B2$, $B3$

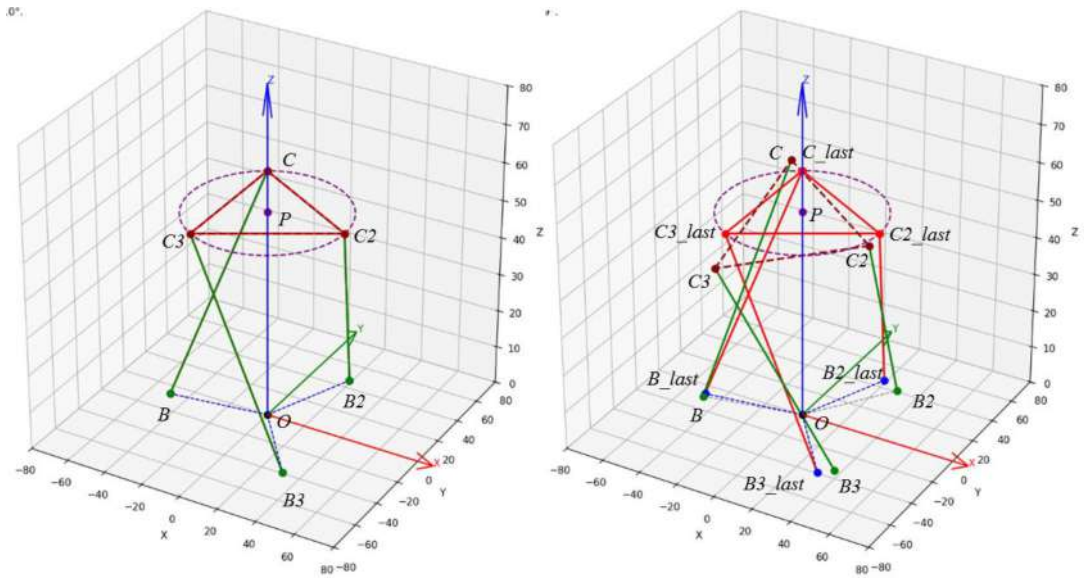


Рис. 7. Приклад 3D візуалізації механізму

По-друге, розроблений алгоритм дозволяє визначати переміщення середніх точок, які відіграють ключову роль у передачі руху між платформою та основою. Завдяки цьому стає можливим більш детально досліджувати кінематичні обмеження та геометричну узгодженість руху всієї конструкції

По-третє, реалізовано обчислення кутів серво двигунів, що виступають безпосередніми керуючими впливами. Це є важливим кроком у напрямку практичної реалізації, оскільки саме ці значення використовуються у системах керування для точного задання положення виконавчих механізмів.

Запропонована система забезпечує візуалізацію руху у дво- та тривимірному просторі, що не лише полегшує налагодження алгоритмів, а й дає інтуїтивне розуміння роботи механізму. Візуальне представлення змін положення платформи робить дослідження більш наочним і дозволяє швидко оцінювати коректність обчислень.

Особливе значення має можливість одночасного відстеження як умовних кутів повороту, так і абсолютних кутів платформи. Це поєднання є критично важливим для систем керування, де необхідно враховувати не лише локальні відносні зміщення, але й глобальне положення механізму у просторі. Такий підхід робить розроблений метод придатним для практичного застосування у робототехнічних комплексах, тренажерах та системах стабілізації, де точність і надійність контролю визначають ефективність всієї системи.

Проведене дослідження доводить, що розроблена математична модель і програмна реалізація дозволяють комплексно вирішувати задачу відстеження координат і кутів у СПМ-подібному механізмі.

Список використаної літератури

1. Derkachenko A., Polyvoda O., Lebedenko Y., Kalinina K. Research of Control Methods of a Spherical Parallel Mechanism Using Intelligent Data Processing. 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). Kremenchuk, Ukraine. 2023. P. 1–5. doi: 10.1109/MEES61502.2023.10402530

2. Автоматизована система діагностики внутрішніх поверхонь промислових автоклавів з використанням сферичного паралельного механізму. Вісник ХНТУ. 2025. №2. С. 1–6. doi: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.6

3. Дімітрова-Бурлаєнко С. Д., Бурлаєнко В. М., Гиря Н. П. Розв’язання задач аналітичної геометрії векторним методом : навч.-метод. посібник. 2-ге вид., випр. і доп. Харків : НТУ «ХПІ», 2020. 50 с.

4. Wang K. A theoretical analysis method of spatial analytic geometry and mathematics under digital twins. Advances in Civil Engineering. 2021. Article ID 8910274. doi: 10.1155/2021/8910274

5. Georgiev S. G., Zennir K., Boukarou A. Multiplicative analytic geometry. Taylor & Francis. 2022. 280 p. doi: 10.1201/9781003325284

6. Lebedenko Y., Polyvoda O., Derkachenko A., Modlo Y., Demishonkova S., Pylypenko Y. (2022). Research of Control Systems for Robotic Spatial Planning Platforms. 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). Kremenchuk, Ukraine. pp. 1–4. doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005765

7. Numpy: Fundamental package for scientific computing with Python. URL: https://numpy.org/ (дата звернення: 14.09.2025).

8. Matplotlib: Visualization with Python. URL: https://matplotlib.org/ (дата звернення: 14.09.2025).

References

1. Derkachenko A., Polyvoda O., Lebedenko Y., Kalinina K. (2023). Research of Control Methods of a Spherical Parallel Mechanism Using Intelligent Data Processing. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine. pp. 1–5. doi: 10.1109/MEES61502.2023.10402530

2. Automated system for diagnostics of internal surfaces of industrial autoclaves using a spherical parallel mechanism. Visnyk KNTU. (2025). № 2. pp. 48–55. [in Ukrainian] doi: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.6

3. Dmytrova-Burlaienko S. D., Burlaienko V. M., Hyria N. P. (2020). Rozviazannia zadach analitychnoi heometrii vektornym metodom: navch.-metod. posibnyk. 2nd ed., rev. and add. Kharkiv : NTU “KhPI”. 50 p.

4. Wang K. (2021). A theoretical analysis method of spatial analytic geometry and mathematics under digital twins. Advances in Civil Engineering. Article ID 8910274. [in Ukrainian] doi: 10.1155/2021/8910274.

5. Georgiev S. G., Zennir K., Boukarou A. (2022). Multiplicative analytic geometry. Taylor & Francis. 280 p. doi: 10.1201/9781003325284

6. Lebedenko Y., Polyvoda O., Derkachenko A., Modlo Y., Demishonkova S., Pylypenko Y. (2022). Research of Control Systems for Robotic Spatial Planning Platforms. 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES). Kremenchuk, Ukraine. pp. 1–4. doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005765

7. Numpy: Fundamental package for scientific computing with Python. Retrieved from https://numpy.org/ (accessed: September 14, 2025)

8. Matplotlib: Visualization with Python. Retrieved from https://matplotlib.org/ (accessed: September 14, 2025).

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 24.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 666.9.022 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.10

Н. О. ДОРОГАНЬ
кандидат технічних наук, доцент,
старший викладач кафедри хімічної технології композиційних матеріалів
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-4304-1297

Л. П. ЧЕРНЯК
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри хімічної технології композиційних матеріалів
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-8479-0545

ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛІКАТНИХ СИСТЕМ З ТЕХНОГЕННОЮ СИРОВИНОЮ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЦЕМЕНТУ

Виробництво цементу відзначається великою ресурсоємністю та базується на використанні природної сировини, родовища якої є вичерпними та невідновлювальними. З цим пов'язана актуальність проблеми заміни природної сировини відходами інших галузей промисловості як техногенною сировиною.

Досліджено силікатні системи для виготовлення цементу на основі композицій різновидів природної та техногенної сировини. Як техногенну сировину використано багатотоннажні відходи агропромисловості – рисову лузгу та теплоенергетики – золу виносу. В роботі комплексно використовувались методи фізико-хімічного аналізу силікатів та стандартизовані технологічні тестування властивостей в'яжучого матеріалу. Розрахунки складу сировинних сумішей проводили із застосуванням комп'ютерної програми «РоманЦем».

Відзначено особливості хіміко-мінералогічного складу рисової лузги як джерела аморфного кремнезему підвищеної реакційної здатності та золи виносу з підвищеним вмістом оксидів заліза і розвиненою склофазою. Проведено розрахунки можливої концентрації вказаної техногенної сировини у сумішах при заданих значеннях гідравлічного і кремнеземного модулів цементу. На основі аналізу комп'ютерних розрахунків визначено нові склади вихідних сировинних сумішей на основі систем вапняк-каолін-рисова лузга та вапняк – рисова лузга – зола виносу із вмістом від 20,0 до 48,5 мас. % компонентів техногенного походження.

Показано особливості фазового складу цементу з сировинних сумішей на основі досліджених силікатних систем при випалі з максимальною температурою 1100 °С та можливість регулювання властивостей мінерального в'яжучого матеріалу при варіюванні розроблених складів вихідних сумішей.

Зроблено висновок, що оцінка можливості та ступеню ефективності використання окремих різновидів техногенної сировини як компонента силікатних систем має враховувати особливості їх агрегатного стану, хіміко-мінералогічного складу та реакційної здатності в процесах фізико-хімічних перетворень в технологічних циклах. При цьому науково обґрунтоване використання відходів промисловості дає можливість комплексного вирішення задач ресурсозбереження та хімічної технології силікатів.

Ключові слова: *цемент, лузга рисова, зола виносу, суміш сировинна, фази кристалічні, властивості.*

N. O. DOROGAN
PhD, Associate Professor,
Senior Lecturer at the Department of Chemical Technology
of Composite Materials
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-4304-1297

L.P. CHERNYAK
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Chemical Technology
of Comosite Materials
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0001-8479-0545

© Дорогань Н. О., Черняк Л. П., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

RESEARCH OF SILICATE SYSTEMS WITH TECHNOGENIC RAW MATERIALS FOR CEMENT PRODUCTION

Cement production is characterized by high resource intensity and is based on the use of natural raw materials, the deposits of which are exhaustible and non-renewable. This makes the problem of replacing natural raw materials with waste from other industries as man-made raw materials relevant.

Silicate systems for the production of cement based on compositions of various natural and man-made raw materials were investigated. As man-made raw materials, high-tonnage waste from the agricultural industry – rice husk and from the heat and power industry – fly ash were used. The work comprehensively used methods of physicochemical analysis of silicates and standardized technological testing of the properties of the binder material: Calculations of the composition of raw material mixtures were carried out using the computer program "RomanCem".

The peculiarities of the chemical and mineralogical composition of rice husk as a source of amorphous silica with increased reactivity and fly ash with an increased content of iron oxides and a developed glass phase are noted. Calculations of the possible concentration of the specified technogenic raw materials in raw material mixtures at given values of the hydraulic and silica moduli of cement were carried out.Based on the analysis of computer calculations, new compositions of the initial raw material mixtures were determined based on the systems limestone-kaolin-rice husk and limestone-rice husk-fly ash with a content of 20.0 to 48.5 wt.% of components of technogenic origin.

The features of the phase composition of cement from raw material mixtures based on the studied silicate systems during firing at a maximum temperature of 1100 °C and the possibility of regulating the properties of the mineral binder by varying the developed compositions of the initial mixtures are shown.

It is concluded that the assessment of the possibility and degree of effectiveness of using individual varieties of technogenic raw materials as a component of silicate systems should take into account the peculiarities of their aggregate state, chemical and mineralogical composition, and reactivity in the processes of physicochemical transformations in technological cycles. At the same time, scientifically based use of industrial waste makes it possible to comprehensively solve the problems of resource conservation and chemical technology of silicates.

Key words: *cement, rice husk, fly ash, raw material mixture, crystalline phases, properties.*

Постановка проблеми

Цемент є найпоширеним в'яжучим матеріалом для зведення споруд різного призначення, в тому числі фортифікаційних. Разом з тим виробництво цементу відзначається великою ресурсоємністю та базується на використанні природної сировини, родовища якої є вичерпними та не відновлювальними. З цим пов'язана актуальність проблеми заміни природної сировини відходами інших галузей промисловості як техногенною сировиною, що потребує відповідних досліджень по розробці нових складів сировинних сумішей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сполучення та фізико-хімічна взаємодія оксидів кремнію, алюмінію, кальцію, заліза є основою технологічних процесів отримання силікатних матеріалів і виробів різного призначення [1, 2]. Джерелом цих оксидів у діючих виробництвах є породоутворюючі мінерали природної сировини, різновиди та концентрація яких визначають особливості структуроутворення силікатних систем в технологічних процесах.

У виробництві цементного клінкеру – основної складової частини кінцевого продукту використовують значні обсяги природної карбонатної та глинистої сировини [3,4], що через вичерпність та невідновлюваність таких родовищ не відповідає сучасним вимогам ресурсозбереження та стабільного розвитку. В цьому зв'язку зростає актуальність заміни компонентів природного походження на відходи інших галузей промисловості як техногенну сировину [5–7].

При цьому згідно з критеріями вибору сировини для силікатних виробництв [8–10] серед багатотоннажних відходів привертають увагу рисова лузга [11, 12] та зола виносу ТЕС [13, 14]. Вказується, що при виготовленні 1 кг білого рису утворюється 0.28 кг рисової лузги як побічний продукт виробництва в процесі помелу. Як наслідок, при річному виробництві 750 млн. т рису в світі утворюється понад 150 млн. т відходів. При цьому рисова лузга може стати джерелом аморфного діоксиду кремнію як активатору фізико – хімічних процесів структуроутворення силікатних систем [15, 16].

Золу виносу отримують на теплових електростанціях, які використовують кам'яне вугілля. Поточний річний обсяг виробництва золи на ТЕС у світі становить 112 мільйонів тон.

Залежно від виду вугілля та технології його спалювання, золи відрізняються за хімічним складом. При переважній більшості CaO вони класифікуються як основні, SiO_2 – як кислі. При цьому мінералогічний склад золи виносу поряд із кристалічними фазами відзначається розвитком скло фази. Звідси ці відходи теплоенергетики розглядаються як джерело додаткових ресурсів для виробництва силікатних будівельних матеріалів [17, 18]. Згідно ДСТУ Б В.2.7-205:2009 [19] зола виносу використовується як компонент для виготовлення важких, легких та ніздрюватих бетонів і будівельних розчинів, а також як тонкомелена добавка для жаростійких бетонів [18]. Як активна мінеральна добавка при помелі клінкеру застосовуються у виробництві цементів, головним чином композиційних.

Проте фактичні обсяги утилізації вказаних відходів агропромисловості та теплоенергетики не відповідають кількісному рівню їх утворення та накопичення. В цьому зв'язку очевидна доцільність і перспективність

використання таких відходів як вихідної техногенної сировини у масоємному виробництві цементу, що потребує поглибленого дослідження складу та структуроутворення відповідних силікатних систем.

Викладення основного матеріалу дослідження

Об'єктом дослідження стали силікатні системи для виготовлення цементу на основі композицій природної та техногенної сировини різного генезису.

Сировинні суміші готували шляхом дозування компонентів за масою, змішування та гомогенізації в кульовому млині, випалу та подрібнення кінцевого продукту відповідно до сучасної технології цементу.

Зразки сировинних сумішей випалювали в печі протягом 15 годин при максимальній температурі 1100 °С, витримуючи при максимумі 1,5 години. Методи фізико-хімічного аналізу силікатної сировини та випробування властивостей в'яжучого матеріалу, які використовувались у цій роботі, включали:

– аналіз хімічного складу із застосуванням стандартизованих процедур;

– рентгенівський дифракційний аналіз (порошкоподібні препарати) за допомогою дифрактометру ДРОН-4-0, підключеного через інтерфейс до комп'ютера, що дозволило проводити зйомку дифрактограм в чисельному вигляді в діапазоні 2–70 2Θ; час експонування кожної точки – 6 секунд. При розшифровці фазового складу використовували базу даних Міжнародного комітету порошкових дифракційних стандартів (JCPDS);

– визначення показників властивостей цементу відповідно до діючих стандартів.

Для визначення раціональних складів вихідної суміші було застосовано різновиди природної та техногенної сировини:

– вапняк Дубовецького родовища Івано-Франківської області;

– каолін КС-1 Глухівецького родовища Вінницької області;

– лузга – відходи переробки рису ТОВ «Рис України» Херсонської області;

– зола виносу – відходи Бурштинської ТЕС Івано-Франківської області.

Серед досліджуваної сировини за хімічним складом (табл. 1) вапняк характеризується найбільшим вмістом оксиду кальцію, каолін та зола виносу – більшим вмістом оксидів кремнію та алюмінію при відмінності в їх кількісному співвідношенні (1,3 проти 2,6), при цьому зола виносу має найбільшу кількість оксидів заліза.

Таблиця 1

Хімічний склад сировини

Назва проби	Вміст оксидів, мас. %									
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	в.п.п
вапняк	3,13	0,06	1,05	–	52,82	0,52	0,10	–	–	42,32
каолін	47,20	36,22	0,32	1,26	0,31	0,22	0,24	0,65	0,47	13,0
рисова лузга	15,64	0,24	0,12	–	0,61	0,45	0,18	0,48	0,28	82,0
Зола виносу	46,12	18,00	22,17	1,78	4,03	1,46	0,21	–	2,10	1,49

Хімічний склад мінеральної складової рисової лузги характеризується переважним вмістом оксиду кремнію, а підвищені втрати маси при прожарюванні (в.п.п) пов'язані з органічною складовою з целюлози $(C_6H_{10}O_5)_n$ та лігнину $(C_{31}H_{34}O_{11})_n$.

За мінералогічним складом вапняк характеризується переважним вмістом кальциту $CaCO_3$, каолініту $2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot H_2O$.

Аналіз мінералогічного складу досліджуваної техногенної сировини показав (рис. 1, 2), що рисова лузга містить аморфний кремнезем з включеннями кристалічного кварцу і кальциту, а зола виносу відзначається наявністю склофази та кристалічних фаз, головним чином – кварцу, муліту.

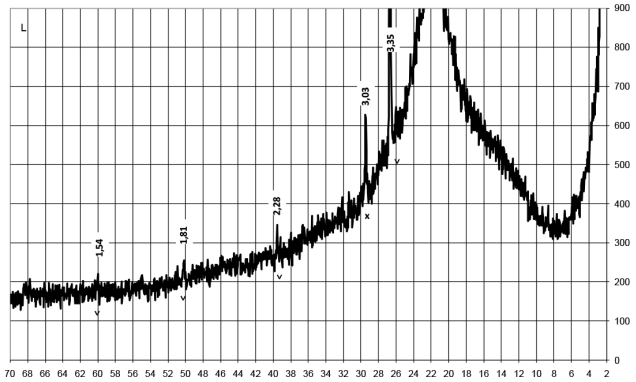


Рис. 1. Дифрактограма рисової лузги: *v* – кварц; *x* – кальцит

За результатами розрахунків із застосуванням комп'ютерної програми «РоманЦем» [20] встановлено, що при використанні системи вапняк-лузга-каолін в інтервалі значень гідравлічного модуля НМ = 1,10–1,70 при введені 10 мас. % каоліну КС-1 можливий вміст рисової лузги становить від 36,6 до 52,0 мас. %, а при введенні 20 мас. % КС-1 – від 10,2 до 30,2 мас. % (рис. 3).

Відповідно до змін кількісного співвідношення компонентів та хімічного складу сировинних сумішей кремнеземистий модуль в'яжучого *n* становить від 2,8 до 3,3 при вмісті 10 мас. % каоліну та від 1,6 до 2,0 при вмісті 20 мас. % каоліну (рис. 4).

Згідно з проведеними розрахунками та аналізом для дослідження особливостей фазового складу та властивостей мінерального в'яжучого з досліджуваної сировини було обрано суміші 15L, 16L на основі системи вапняк-рисова лузга-каолін та 18L, 19L на основі системи вапняк-рисова лузга-зола виносу (табл. 2).

Досліджувані суміші характеризуються відмінностями хімічного складу (табл. 3). Так, суміші 18L, 19L із золою виносу відрізняються від 15L, 16L із каоліном більшим кількісним співвідношенням оксидів: SiO_2 : Al_2O_3,

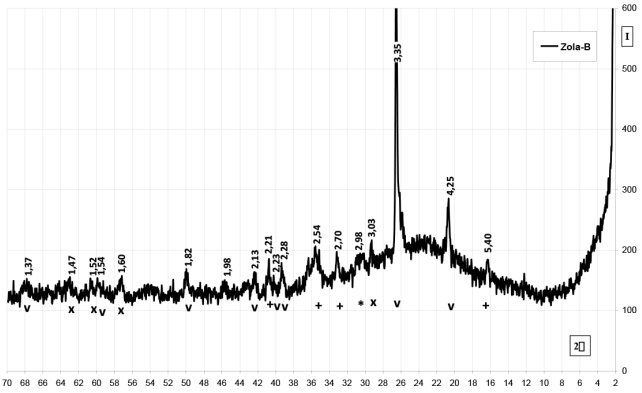


Рис. 2. Дифрактограма золи виносу: *v* кварц, + муліт, *x* кальцит

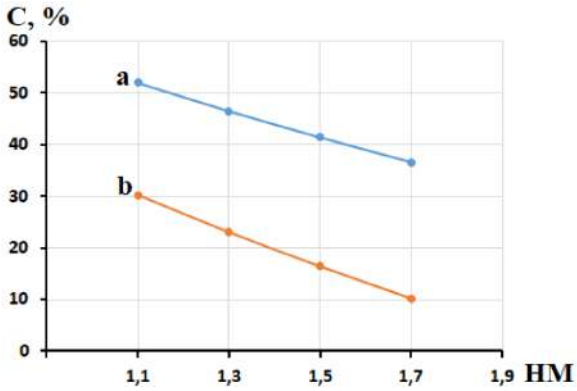


Рис. 3. Залежність вмісту рисової лузги (С) в системі вапняк-лузга-каолін від гідравлічного модуля НМ при введені каоліну 10 мас. %. (a) і 20 мас. % (b)

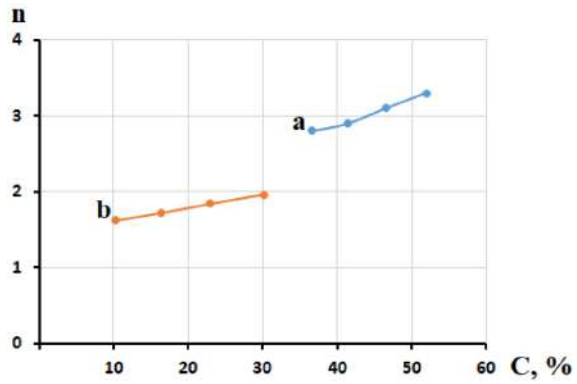


Рис. 4. Залежність кремнеземного модуля *n* від вмісту рисової лузги (*C*) в системі вапняк-лузга-каолін при введені каоліну 10 (*a*) і 20 (*b*) мас. %

Таблиця 2

Склад сировинних сумішей

Код проби	Вміст компонентів, мас. %			
	вапняк	лузга рисова	каолін КС-1	зола виносу
15L	63,5	20,0	16,5	–
18L	64,0	20,0	–	16,0
16L	51,5	40,0	9,0	–
19L	51,5	40,0	–	8,5

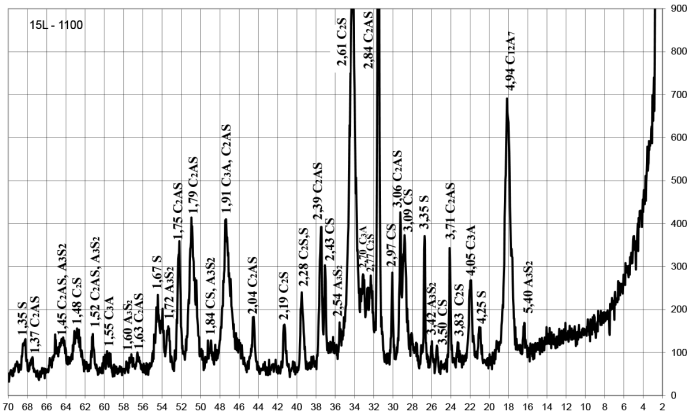
Таблиця 3

Хімічний склад сировинних сумішей

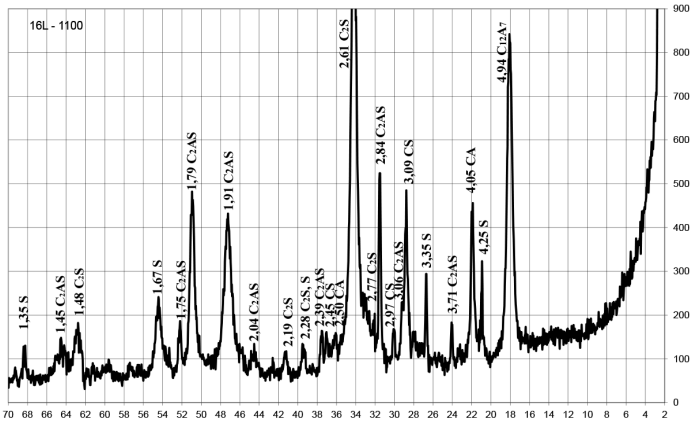
Код проби	Вміст оксидів, мас. %						
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	в.п.п
15L	13,02	6,13	0,74	33,84	0,46	0,14	45,67
18L	12,91	3,11	4,41	34,77	0,67	0,13	44,00
16L	12,12	3,36	0,62	27,32	0,47	0,14	55,92
19L	12,05	1,75	2,58	27,87	0,58	0,14	55,03

що становить 4,2–6,9 проти 2,1–3,6 та вказує на меншу тугоплавкість. При приблизно однаковому кількісному співвідношенні оксидів CaO : SiO_2 = 2,2–2,7, що вказує на вірогідність утворення при випалі кристалічних фаз силікатів кальцію, суміші із золою виносу відрізняються більшим кількісним співвідношенням оксидів CaO : Al_2O_3 (11,2–15,9 проти 5,5–8,1), що вказує на вірогідність утворення при випалі кристалічних фаз алюмінатів та алюмосилікатів кальцію.

Рентгенофазовий аналіз дозволив виявити деякі особливості фазових перетворень при випалі досліджуваних сумішей (рис. 5, 6).

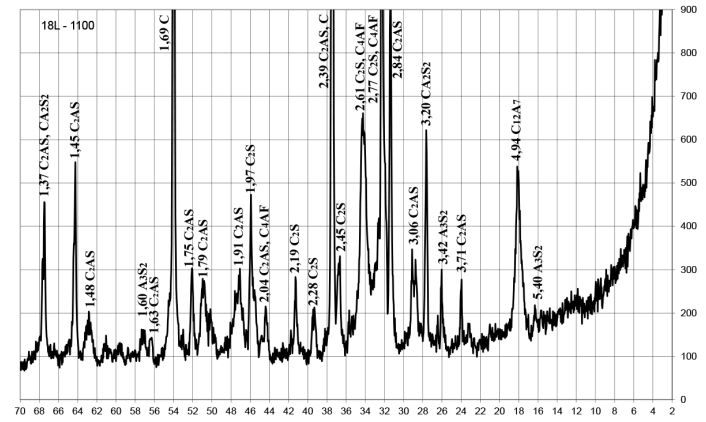


a

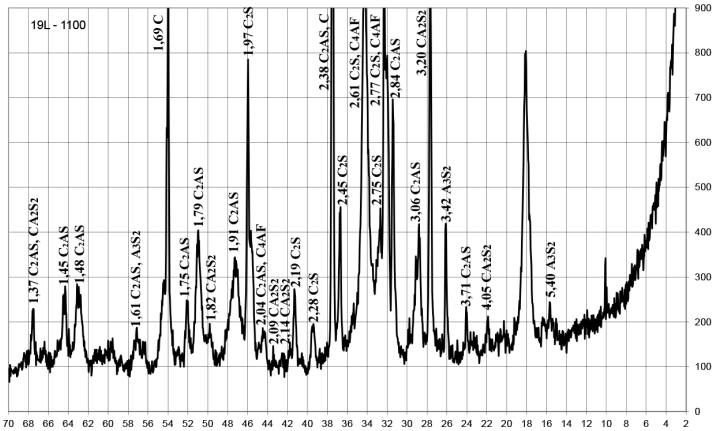


b

Рис. 5. Дифрактограми проб 15L (a), 16L (b) (1100 °C)



a



b

Рис. 6. Дифрактограма проб 18L (a), 19L (b) (1100 °C)

Так, після випалу з максимальною температурою 1100 °C матеріал із суміші 16L у порівнянні з 15L відрізняється:

- щодо кристалічних фаз силікатів кальцію – при приблизно одноковому утворенні C_2S (2,7, 2,61 Å) меншим розвитком CS (2,97 Å);
- щодо кристалічних фаз алюмосилікатів кальцію – меншим утворенням геленіту C_2AS (2,84, 3,06, 1,75 Å);
- щодо кристалічних фаз алюмінатів кальцію – інтенсифікацією утворення майєніту $C_{12}A_7$ (4,90 Å) та CA (4,05 Å);
- мінімізацією утворення муліту A_3S_2 (5,40, 3,42 Å).

Проби 18L, 19L відзначаються суттєвим вмістом CaO (1,69, 2,38 Å), при цьому 19L у порівнянні з 18L відрізняється:

- щодо кристалічних фаз силікатів кальцію – більшим утворенням C_2S (2,75, 2,61, 197 Å);
- щодо кристалічних фаз алюмосилікатів кальцію – меншим утворенням геленіту C_2AS (2,84, 3,71, 1,75 Å) при інтенсифікації розвитку анортиту CAS_2 (3,20, 4,04, 1,79 Å);
- щодо кристалічних фаз алюмінатів кальцію – інтенсифікацією утворення майєніту $C_{12}A_7$ (4,90 Å).

Отримані результати технологічних випробувань проб на основі досліджуваних силікатних систем після випалу на 1100 °C свідчать про відмінності їх в'яжучих властивостей (табл. 4).

Згідно класифікації ДСТУ Б В.27-91-99 [21] за швидкістю тужавлення проби в'яжучого 15L і 16L з 20–40 мас. % лузги відноситься до групи нормальнотужавіючих (термін початку від 45 хв. до 2 годин), характерними представниками якої вважаються портландцемент і шлакопортландцемент.

Проби 18L, 19L із комплексним застосуванням рисової лузги та золи виносу відносяться до груп надшвидкотужавіючих (18L), характерними представниками якої вважаються розширювальні та напрягаючий цементи, і швидкоотужавіючих (19L), характерними представниками якої вважаються ангідритовий та глиноземистий цементи.

Щодо механічних властивостей, зразки 18L, 19L із сумішей зі золою виносу відносяться за ДСТУ до групи середньої міцності, характерної для портландцементу з добавками та шлакопортландцементу, і перевищують зразки 15L, 16L із сумішей з каоліном. Це повязується із вказаними відмінностями кристалічних фаз, розподілених у зразках із золою виносу в більш розвиненій склофазі.

Таблиця 4

Властивості в'яжучого матеріалу

		15L	18L	16L	19L
Тонкість помелу, залишок на ситі 008, мас. %		7	7	8	8
Густота, %		30	32	30	34
Терміни тужавлення, хв.	початок	55	10	55	20
	кінець	260	20	270	50
Міцність на стиск через 28 діб, МПа		23,8	31,4	23,0	35,5

Висновки

Оцінка можливості та ступеню ефективності використання окремих різновидів техногенної сировини як компонента силікатних систем має враховувати особливості їх агрегатного стану, хіміко-мінералогічного складу та реакційної здатності в процесах фізико-хімічних перетворень в технологічних циклах.

В цьому зв'язку досліджені відходи промисловості у силікатних системах для виготовлення цементу здатні суттєво впливати на процеси спікання та фазові перетворення при випалі за рахунок аморфного кремнезему рисової лузги, оксидів заліза та склофази золи виносу.

Встановлено можливість отримання різновиду цементу низькотемпературного випалу (≤ 1200 °С) із варіюванням в'яжучих властивостей на основі систем крейла-каолін-рисова лузга та крейда-рисова лузга-зола виносу при використанні у вихідних сумішах від 20,0 до 48,5 мас. % техногенної сировини.

Список використаної літератури

1. Liebau F. (1985). Structural Chemistry of Silicates. Structure, Bonding, and Classification. Berlin, Heidelberg: Springer.

2. Гречанюк В. (2006). Фізична хімія і хімія силікатів. Київ : Кондор.

3. Duda, W. H. (1988). Cement Data Book, Volume 3: Raw Material for Cement Production. French & European Pubns. 188 с.

4. Рунова Р. Ф., Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Носовський Ю. Л. (2012). В'яжучі речовини. Київ : Основа. 446 с.

5. Allen, D. T., & Benmanesh, N. (1994). Wastes as Raw Materials. In The Greening of Industrial Ecosystems (pp. 69–89). Washington: National Academy Press. https://www.nap.edu/read/2129/chapter/7

6. Bhatia, H. S. (2020). A Comprehensive Book on Industrial Waste and Its Management. Delhi (India) : The Readers Paradise. 250 с.

7. Ramesh, M., Karthic, K. S., Karthikeyan, T., & Kumaravel, A. (2014). Construction materials from industrial wastes – a review of current practices. International Journal of Environmental Research and Development, 4(4), 317–324. https://www.ripublication.com/ijerd_spl/ijerdv4n4spl_08.pdf

8. Черняк Л. П. (2003). Критерії вибору сировини для сучасного виробництва будівельної кераміки. Будівельні матеріали та вироби, № 1, С. 2–4; № 2, С. 6–8.

9. Ghosh S. N. (2003). Advances in Cement Technology: Chemistry, Manufacture and Testing. Taylor & Francis. 828 с.

10. Winter, N. B. (2012). Understanding Cement. WHD Microanalysis Consultants Ltd. 206 с.

11. Masoumeh Kordi, Naser Farrokhi, Martin I. Pech-Canul, & Asadollah Ahmadikhah. (2024). Rice Husk at a Glance: From Agro-Industrial to Modern Applications. Rice Science, 31(1), 14–32.

12. Maryoto, A., & Sudibyo, G. H. (2018). Rice husk as an alternative energy for cement production and its effect on the chemical properties of cement. MATEC Web of Conferences, 195, 01009.

13. Kar, K. K. (2021). Handbook of Fly Ash. Elsevier. 868 с.

14. Alterary, S. S., & Marei, N. H. (2021). Fly ash properties, characterization, and applications: A review. Journal of King Saud University, 33(6).

15. Sun, L., & Gong, K. (2001). Silicon-based materials from rice husks and their applications. Industrial & Engineering Chemistry Research, 40(25), 5861–5877. DOI: 10.1021/ie010284b

16. Real, C., Alcala, M. D., & Criado, J. M. (1996). Preparation of Silica from Rice Husks. Journal of the American Ceramic Society, 79(8), 2012–2016.

17. Kou, S., Poon, C., & Chan, D. (2007). Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. Materials in Civil Engineering, 19, 709–717.

18. Ondova, M., Stevulova, N., & Estokova, A. (2012). The Study of the Properties of Fly Ash Based Concrete Composites with Various Chemical Admixtures. Procedia Engineering, 42, 1863–1872.

19. ДСТУ Б В.2.7-205:2009. Золи-виносу теплових електростанцій для бетонів. Технічні умови. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 12 с.

20. Свідерський, В. А., Черняк, Л. П., Сангінова, О. В., Дорогань, Н. О., Цибенко М.Ю. (2017). Програмне забезпечення технології низькотемпературних в'яжучих матеріалів. Будівельні матеріали та вироби, №1–2(93), 22–24.

21. ДСТУ Б В.2.7-91-99. В'яжучі мінеральні. Класифікація. Київ : Держбуд України, 1999. 26 с.

References

1. Liebau F. (1985) Structural chemistry of silicates. Structure, bonding, and classification. Berlin, Heidelberg : Springer, 347 p.

2. Hrechaniuk V. (2006) Fizychna khimiia i khimiia sylikativ [Physical chemistry and chemistry of silicates]. Kyiv : Kondor, 320 p. (in Ukrainian).

3. Duda W. H. (1988) Cement data book, Volume 3: Raw material for cement production. French & European Pubns, 188 p.

4. Runova R. F., Dvorkin L. Y., Dvorkin O. L., Nosovskyi Yu. L. (2012) Viazhuchi rechovyny [Binders]. Kyiv : Osnova, 446 p. (in Ukrainian).

5. Allen D. T., Benmanesh N. (1994) Wastes as raw materials. In: The greening of industrial ecosystems, pp. 69–89. Washington : National Academy Press. Available at: https://www.nap.edu/read/2129/chapter/7 (accessed 26 September 2025).

6. Bhatia H. S. (2020) A comprehensive book on industrial waste and its management. Delhi (India) : The Readers Paradise, 250 p.

7. Ramesh M., Karthic K. S., Karthikeyan T., Kumaravel A. (2014) Construction materials from industrial wastes – a review of current practices. International Journal of Environmental Research and Development, vol. 4, no. 4, pp. 317–324. Available at: https://www.ripublication.com/ijerd_spl/ijerdv4n4spl_08.pdf (accessed 26 September 2025).

8. Chernyak L. P. (2003) Kryterii vyboru syrovyny dlia suchasnoho vyrobnytstva budivelnoi keramiky [Criteria for choosing raw materials for modern production of building ceramics]. Budivelni materialy ta vyroby [Building materials and products], no. 1, pp. 2–4; no. 2, pp. 6–8. (in Ukrainian).

9. Ghosh S. N. (2003) Advances in cement technology: Chemistry, manufacture and testing. Taylor & Francis, 828 p.

10. Winter N. B. (2012) Understanding cement. WHD Microanalysis Consultants Ltd, 206 p.

11. Kordi M., Farrokhi N., Pech-Canul M. I., Ahmadikhah A. (2024) Rice husk at a glance: From agro-industrial to modern applications. Rice Science, vol. 31, no. 1, pp. 14–32.

12. Maryoto A., Sudibyo G. H. (2018) Rice husk as an alternative energy for cement production and its effect on the chemical properties of cement. MATEC Web of Conferences, vol. 195, 01009.

13. Kar K. K. (2021) Handbook of fly ash. Elsevier, 868 p.

14. Alterary S. S., Marei N. H. (2021) Fly ash properties, characterization, and applications: A review. Journal of King Saud University, vol. 33, no. 6.

15. Sun L., Gong K. (2001) Silicon-based materials from rice husks and their applications. Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 40, no. 25, pp. 5861–5877. DOI: 10.1021/ie010284b

16. Real C., Alcala M. D., Criado J. M. (1996) Preparation of silica from rice husks. Journal of the American Ceramic Society, vol. 79, no. 8, pp. 2012–2016

17. Kou S., Poon C., Chan D. (2007) Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. Materials in Civil Engineering, vol. 19, pp. 709–717.

18. Ondova M., Stevulova N., Estokova A. (2012) The study of the properties of fly ash based concrete composites with various chemical admixtures. Procedia Engineering, vol. 42, pp. 1863–1872.

19. Zoly-vynosu teplovykh elektrostantsii dlia betoniv. Tekhnichni umovy [Fly ash from thermal power plants for concrete. Technical conditions]. DSTU B V.2.7-205:2009. Kyiv: Minrehionbud of Ukraine, 12 p. (in Ukrainian).

20. Sviderskyy V. A., Chernyak L. P., Sanginova O. V., Dorohan N. O., Tsybenko M. Yu. (2017) Prohramne zabezpechennia tekhnolohii nyzkotemperaturnykh viazhuchykh materialiv [Software for low-temperature binder technology]. Budivelni materialy ta vyroby [Building materials and products], no. 1–2(93), pp. 22–24. (in Ukrainian).

21. Viazhuchi mineralni. Klasyfikatsiia [Mineral binders. Classification]. DSTU B V.2.7-91-99. Kyiv : Derzhbud Ukrainy, 26 p. (in Ukrainian).

Дата першого надходження рукопису до видання: 20.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 16.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 656.07 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.11

К. М. ДУМЕНКО
доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри інженерних технологій
ПЗВО «Міжнародний класичний університет імені Пилипа Орлика»
ORCID: 0000-0002-9718-6408

В. Ф. ГАРЬКАВА
доктор економічних наук, професор,
завідувач кафедри інженерних технологій
ПЗВО «Міжнародний класичний університет імені Пилипа Орлика»
ORCID: 0000-0003-3033-8515

С. М. ПИЛИПЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри готельно-ресторанної справи та туризму
ПЗВО «Міжнародний класичний університет імені Пилипа Орлика»
ORCID: 0000-0002-2034-8552

О. Б. ЗВЯГІНЦЕВА
доктор економічних наук, доцент,
завідувач кафедри готельно-ресторанної справи та туризму
ПЗВО «Міжнародний класичний університет імені Пилипа Орлика»
ORCID: 0000-0003-1551-5835

О. Ю. ВЕРЛАНОВ
кандидат економічних наук, доцент,
завідувач кафедри менеджменту та фінансів
ПЗВО «Міжнародний класичний університет імені Пилипа Орлика»
ORCID: 0000-0002-4756-0860

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В УКРАЇНІ І СВІТІ

У статті досліджується вплив сучасних викликів на логістичний сектор України, підкреслюючи його вирішальну роль в управлінні ланцюгами поставок та їх інтеграції у світову економіку. Політична нестабільність та військові конфлікти серйозно порушили логістику, зокрема через закриття портів та блокування транспортних шляхів, що зумовило необхідність негайних стратегічних коригувань з боку компаній. А транспорт є невід'ємною частиною будь-якої економіки та вважається каталізатором економічного розвитку. Україна, будучи однією з найбільших країн Європи, завжди приділяла особливу увагу розвитку своєї транспортної інфраструктури. Протягом багатьох років в Україні були розроблені та модернізовані різні види транспорту, включаючи залізничний, автомобільний, повітряний та водний. У цій статті ми обговоримо розвиток транспортних технологій в Україні, зосереджуючись на різних видах транспорту, їхніх проблемах та перспективах. Таким чином, процес оптимізації товароруху шляхом підвищення конкурентоспроможності системи збуту висуває на передній план маркетинг та логістику. Організація ефективного регулювання наскрізних матеріальних потоків у сфері обігу, яке передбачається логістикою, принципово відрізняється від традиційного управління товарорухом можливістю інтегрувати окремі елементи ланцюга постачання продукції єдину систему. Як наслідок цей підхід ґрунтується на виділенні єдиної функції контролю та оптимізації матеріальних, інформаційних та фінансових витрат. за максимально можливого рівня забезпечення сервісу товароруху.

Однією із причин активного використання логістики в економічно розвинутих країнах стала енергетична криза і перехід на параметри енергозбереження в економіці. Зважаючи на заяви вищого керівництва нашої держави, можна сміливо стверджувати, що перехід України на енергозберігаючі технології є фактично вирішеною справою. В цьому аспекті в роботі особливо уважно вивчали можливості логістики в даному напрямку. У статті досліджено сучасні проблеми розвитку транспортно-логістичних центрів Західної Європи та України. Стосовно України можна відмітити, що зараз активно розвиваються 3P і 4PL операційна діяльність. Проаналізовано особливості формування транспортно-логістичної інфраструктури в Україні. Визначено основні перешкоди

© Думенко К. М., Гарькава В. Ф., Пилипенко С. М., Звягінцева О. Б., Верланов О. Ю., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

розвитку вітчизняного логістичного ринку. Вироблено рекомендації щодо вдосконалення процесу проектування національної мережі транспортно-логістичних центрів.

Ключові слова: *транспортно-логістичний центр, транспортна логістика, світовий досвід, транспортна інфраструктура.*

K. M. DUMENKO
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Engineering Technologies
Pylyp Orlyk International Classical University
ORCID: 0000-0002-9718-6408

V. F. HARKAVA
Doctor of Economic Sciences, Professor,
Head of the Department of Engineering Technologies
Pylyp Orlyk International Classical University
ORCID: 0000-0003-3033-8515

S. M. PYLYPENKO
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Hotel
and Restaurant Management and Tourism
Pylyp Orlyk International Classical University
ORCID: 0000-0002-2034-8552

O. B. ZVIAHINTSEVA
Doctor of Economic Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Hotel and Restaurant Management and Tourism
Pylyp Orlyk International Classical University
ORCID: 0000-0003-1551-5835

O. YU. VERLANOV
Candidate of Economic Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Management and Finance
Pylyp Orlyk International Classical University
ORCID: 0000-0002-4756-0860

CURRENT PROBLEMS OF DEVELOPMENT OF TRANSPORT TECHNOLOGIES IN UKRAINE AND THE WORLD

The article examines the impact of modern challenges on the logistics sector of Ukraine, emphasizing its crucial role in managing supply chains and their integration into the global economy. Political instability and military conflicts have seriously disrupted logistics, in particular through the closure of ports and the blocking of transport routes, which necessitated immediate strategic adjustments by companies. Transport is an integral part of any economy and is considered a catalyst for economic development. Ukraine, being one of the largest countries in Europe, has always paid special attention to the development of its transport infrastructure. Over the years, various types of transport have been developed and modernized in Ukraine, including rail, road, air and water. In this article, we will discuss the development of transport technologies in Ukraine, focusing on various types of transport, their problems and prospects. Thus, the process of optimizing goods movement by increasing the competitiveness of the sales system brings marketing and logistics to the forefront. The organization of effective regulation of end-to-end material flows in the sphere of circulation, which is provided by logistics, fundamentally differs from traditional goods movement management in the ability to integrate individual elements of the product supply chain into a single system. As a result, this approach is based on the allocation of a single function of control and optimization of material, information and financial costs. with the highest possible level of provision of goods movement service.

One of the reasons for the active use of logistics in economically developed countries was the energy crisis and the transition to energy-saving parameters in the economy. Given the statements of the top leadership of our state, we can safely say that Ukraine's transition to energy-saving technologies is actually a done deal. In this aspect, the work especially carefully studied the possibilities of logistics in this direction. The article examines the current problems of development of transport and logistics centers of Western Europe and Ukraine. Regarding Ukraine, it can be noted that 3P and 4PL operational activities are currently actively developing. The features of the formation of transport and logistics infrastructure in Ukraine are analyzed. The main obstacles to the development of the domestic logistics market are identified. Recommendations are made to improve the process of designing a national network of transport and logistics centers.

Key words: *transport and logistics center, transport logistics, world experience, transport infrastructure.*

Постановка проблеми

Впровадження у практику бізнесу нових інформаційних технологій та телекомунікаційних систем дозволяє перейти до інтегрованої логістики та нових концепцій в управлінні ланцюгами постачання. Однак таких досягнень логістика досягла не одразу, а пройшовши певний еволюційний шлях розвитку. Сталий розвиток транспортної галузі є надзвичайно важливим з кількох причин [1–5]:

- більшість об'єктів інфраструктури в країні застаріли, що призводить до неефективного перевезення вантажів та людей. Багато автомобільних та залізничних колій, а також портових споруд мають низький рівень якості, що ускладнює розвиток внутрішньої та міжнародної логістики. Модернізація доріг, мостів, залізниць та портів має вирішальне значення для забезпечення безпеки та ефективності перевезень;
- транспортний сектор є одним з найбільших джерел викидів парникових газів в Україні. Україна, як і інші країни, стикається з необхідністю скорочення викидів парникових газів. Розвиток електричного транспорту, модернізація залізниць та впровадження екологічно чистих технологій у транспортну інфраструктуру є актуальними напрямками сталого розвитку. Зменшення навантаження на навколишнє середовище шляхом впровадження нових технологій є завданням на найближче майбутнє;
- транспортний сектор потребує значних інвестицій для реконструкції та модернізації. Проблеми з фінансуванням державних проектів можна вирішити, залучивши міжнародні фінансові установи та приватних інвесторів;
- для інтеграції з європейським та світовим ринками важливо розвивати мультимодальні транспортні вузли (поєднання різних видів транспорту), що знизить транспортні витрати та підвищить конкурентоспроможність. Доставка вантажів за єдиним транспортним документом мультимодального перевезення створює ряд переваг для відправника вантажу, оскільки він має справу лише з оператором мультимодальних перевезень.

Після підписання Угоди про асоціацію з ЄС, Україна змогла інтегрувати свою транспортну інфраструктуру в загальноєвропейську. Україна має потенціал для гармонізації своїх транспортних стандартів з європейськими. Це створює можливості для кращої інтеграції в європейські транспортні мережі. Це вимагатиме адаптації до стандартів ЄС та створення більш гнучких логістичних систем. Тому дослідження проблеми розвитку транспортної галузі є надзвичайно актуальним, оскільки воно безпосередньо впливає на економічне зростання країни, екологічний баланс та інтеграцію в світові ринки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розвиток транспортної галузі України є передумовою економічного зростання, екологічної стабільності та інтеграції в міжнародні транспортні мережі. Тому дослідження проблем сталого розвитку транспортної галузі є надзвичайно актуальним. Значний внесок у розвиток теорії і практики транспортно-логістичного сервісу внесли наукові праці В. Л. Диканя, А. М. Пасічника, І. В. Токмакової, О. М. Полякової та інших учених [5–8]. Питанням використання досвіду країн світу у створенні транспортнологістичних центрів в світі та в Україні присвячені праці В. В. Мандри, Н. С. Питуляка, С. В. Савенко, А. В. Кузьменко, Н. П. Тарнавської, Н. М. Петруха, С. В. Петруха [9–15]. Водночас окремі питання у цій сфері потребують подальшого аналізу, такі як дослідження особливостей формування мережі мультимодальних транспортно-логістичних центрів в умовах зростаючої привабливості транспортних перевезень в Україні.

Формулювання мети дослідження

Мета статті – дослідити актуальні проблеми розвитку транспортних технологій в Україні і Світі та особливості актуальні для України під час ведення бойових дій.

Викладення основного матеріалу дослідження

Сучасний транспорт є важливою галуззю матеріального виробництва, що забезпечує виробничий зв'язок між різними секторами економіки та здійснює перевезення вантажів та пасажирів. Автомобільний транспорт, як провідний складник транспорту, реалізує приблизно 82 % та 13 % відповідно обсягу світових пасажирських та вантажних перевезень. Залежно від типу транспорту, що використовується, можна виділити такі перевезення, що найчастіше зустрічаються:

– залізничні + авто (передача вантажу здійснюється на залізничній станції відправлення, звідки організується перевезення до залізничної станції призначення з проходженням митного оформлення на ній та вивезенням на машині розмитненого вантажу або вивозом на машині нерозмитненого вантажу та його митним оформленням на автомобільному складі тимчасового зберігання з подальшою доставкою до складу одержувача) Залізничний транспорт є одним із найстаріших видів транспорту в Україні. Перша залізнична лінія була побудована в 1861 році, вона з'єднала Київ і Балту. Відтоді залізнична мережа в Україні розширилася і стала найрозгалуженішою в Європі, охоплюючи відстань 23 000 кілометрів. Залізнична система відіграє життєво важливу роль в економіці країни, перевозячи товари та пасажирів по всій країні та до сусідніх країн. Однак система стикається з різними проблемами, включаючи застарілу інфраструктуру, недостатнє фінансування та брак сучасного обладнання. Уряд ініціював різні реформи, спрямовані на модернізацію залізничної системи, такі як залучення приватних інвестицій та впровадження нової тарифної системи. Незважаючи на ці проблеми, залізнична система залишається критично важливим видом транспорту в Україні;

– море + з/д + авто (передача вантажу здійснюється в порту відправлення, звідки організується перевезення морем до порту призначення з митним оформленням у ньому та вивозом по залізничному розмитненому вантажу до станції призначення або з перевантаженням морського порту на залізничну станцію та перевезенням залізничним митним оформленням на залізничній станції призначення та доставкою до складу одержувача);

– море + авто (передача вантажу здійснюється в порту відправлення, звідки організується перевезення морем до порту призначення з митним оформленням у ньому та вивезенням машиною розмитненого вантажу або вивезенням на машині нерозмитненого вантажу та його митним оформленням на автомобільному транспорті з подальшою доставкою до складу одержувача);

– авто + море + з/д + авто (передача вантажу складає складі відправника, звідти його вивозять машиною до порту відправлення, звідки організується перевезення морем до порту призначення з митним оформленням у ньому та вивезенням залізницею розмитненого вантажу до станції призначення, або з перевантаженням з морського порту на залізничну станцію та перевезенням залізницею з митним оформленням на залізничній станції призначення та вивозом з неї на машині розмитненого вантажу, або вивезенням на машині нерозмитненого вантажу та його митним оформленням на автомобільному транспорті, з наступною доставкою до складу одержувача).

Автомобільний транспорт є найпопулярнішим видом транспорту в Україні, маючи понад 165 000 кілометрів доріг. Країна значно інвестувала у розвиток своєї дорожньої інфраструктури, включаючи будівництво автомагістралей та модернізацію існуючих доріг. Однак дорожня система стикається з різними проблемами, такими як високий рівень аварійності, погане технічне обслуговування та недостатнє фінансування. Уряд ініціював різні реформи, спрямовані на підвищення безпеки дорожнього руху, такі як запровадження суворих правил і правил дорожнього руху та впровадження нової системи навчання та навчання водіїв. Уряд також прагнув залучити приватні інвестиції для фінансування будівництва та технічного обслуговування доріг. Незважаючи на ці проблеми, дорожня система залишається життєво важливим видом транспорту в Україні, що з'єднує різні регіони країни;

– авто + авіа (передача вантажу складає складі відправника, звідти його вивозять машиною до аеропорту відправлення, звідки організується перевезення авіаційним транспортом до аеропорту призначення, де відбувається митне оформлення та доставка розмитненого вантажу до складу одержувача). Повітряний транспорт є критично важливим видом транспорту в Україні, що з'єднує країну з іншими частинами світу. В Україні понад 20 аеропортів, включаючи міжнародний аеропорт Бориспіль, який є найбільшим аеропортом у країні. Уряд значно інвестував у розвиток інфраструктури повітряного транспорту, зокрема в модернізацію існуючих аеропортів та будівництво нових. Однак система повітряного транспорту стикається з різними проблемами, такими як застаріла інфраструктура, недостатнє фінансування та брак сучасного обладнання.

Уряд ініціював різні реформи, спрямовані на модернізацію системи повітряного транспорту, такі як залучення приватних інвестицій та впровадження нових правил для забезпечення безпеки. Незважаючи на ці проблеми, система повітряного транспорту залишається життєво важливим видом транспорту в Україні. Важливим завданням є гармонізація транспортних стандартів України з Європейським Союзом. Це дозволить: підвищити ефективність транзитних перевезень через Україну; спростити прикордонний та митний контроль; створити ефективні транспортні коридори в рамках європейської програми TEN-T (Трансєвропейська транспортна мережа).

Забезпечення безпеки як пасажирських, так і вантажних перевезень є ключовим напрямком сталого розвитку. Це включає: впровадження сучасних стандартів безпеки автомобільного та залізничного транспорту; удосконалення системи обліку та аналізу аварійності для визначення найбільш небезпечних ділянок та їх подальшу модернізацію; проведення інформаційних кампаній з метою підвищення обізнаності про безпеку дорожнього руху. Сталий розвиток транспортної галузі України вимагає комплексного підходу, що включає модернізацію інфраструктури, впровадження інноваційних технологій, зменшення впливу на навколишнє середовище та інтеграцію з міжнародними транспортними системами. Розвиток у цих сферах покращить якість перевезень, покращить стан навколишнього середовища та економічне зростання країни. Транспортна галузь України стикається з численними викликами, такими як погіршення стану інфраструктури.

З метою оцінки розвитку логістичних систем різних країн виникла необхідність у розробці та прийнятті нових методичних положень, які змогли б комплексно відповісти на цей питання. Вперше така спроба була зроблена Світовим банком спільно з фінськими вченими університету Турку. Вони запропонували використати комплексний показник, названий «Індекс ефективності логістики LPI» (англ. Logistics Performance Index), який дозволив би оцінити рівень розвитку логістики у кожній країні з метою виявлення проблем та можливостей у сфері підвищення ефективності логістичної діяльності з урахуванням таких факторів як: організація міжнародних перевезень; стан інфраструктури та роботи митних органів; правове забезпечення логістичної діяльності; якість і своєчасність послуг.

Згідно з останньою методикою опитування, вона включає дві складові: перша частина визначає міжнародний індекс LPI; друга – дозволяє визначити внутрішній індекс. Потім розраховується сумарний LPI за 5-бальною шкалою, що показу ранг країни серед усіх держав, що беруть участь у рейтингу. Таким чином, перший індекс ефективності логістики – це сумарний. показник ефективності роботи шести основних компонентів міжнародного сектора логістики, а другий – внутрішнього. Багато країн оцінюють за допомогою цього показника ефективність

національних стратегій у галузі логістики та транспорту. Показник LPI та його індикатори є ключовими показниками транспортно-логістичної діяльності більшості міжнародних організацій, таких як ЄС, ASEAN та ін.

Світовий банк визначає індекс на підставі світового опитування різних експертів країн із кращим рівнем розвитку логістики. Вперше така оцінка була зроблена в 2007 році і з цього часу результати досліджень показника LPI стали постійними. Індекс складається на підставі загальносвітового опитування міжнародних логістичних та експедиторських компаній за шістьма найважливішими критеріями розвитку логістики. З 2020 р. оцінка проводиться експертами кожні два роки більш ніж у 160 країнах світу. Такий інтервал часу вибраний для більш точної оцінки та забезпечення кращої основи для порівняння країн, що знаходяться на середньому рівні, бали яких трохи відрізняються, якщо позиції країн навіть далекі один від одного. Останні оцінки здійснюються з використанням агрегованих значень LPI та відстеження їх динаміки для збалансованої картини ефективності логістичній діяльності країн.

В оцінці індексу ефективності логістики, що проводилася у 2024 році, була використана та сама методологія, як і в попередні роки, тобто стандартні питання, що включають як міжнародний, так і внутрішній рівні. У першому випадку респонденти восьми основних країн оцінювали ефективність розвитку логістики за шістьма показниками. У другому – в анкеті респондентів просили відповісти на питання щодо кількісних та якісних параметрів розвитку логістики у країнах, де вони працюють.

Фахівці в галузі логістичної діяльності у 2018 році здійснили близько 6000 оцінок щодо країн, що взяли участь в опитуванні. Перше місце в рейтингу, останніми роками, починаючи з 2014 р., займає Німеччина. У 2018 році вона мала показник LPI рівний 4,2 бали. У першу десятку з найефективнішою логістичною системою входять також розвинені країни з високим рівнем доходів душу населення: Швеція з LPI становить 4,05 бала; Бельгія – 4,04; Японія – 4,03; Нідерланди – 4,02 та інших. У той же час США розташувалися лише з 14 місці, а Росія лише з 75. Крім основного дворічного дослідження, рейтинг представляє і агреговані результати, що поєднують дані останніх чотирьох рейтингів. Оцінки шести компонентів у рамках досліджень LPI 2012, 2014, 2016 та 2018 рр. були використані для створення загальної картини, що дозволяє більш об'ємно переглянути показники логістики країн-учасниць. Цей підхід зменшує випадкові відхилення від одного опитування LPI до іншого та підвищує достовірність результатів.

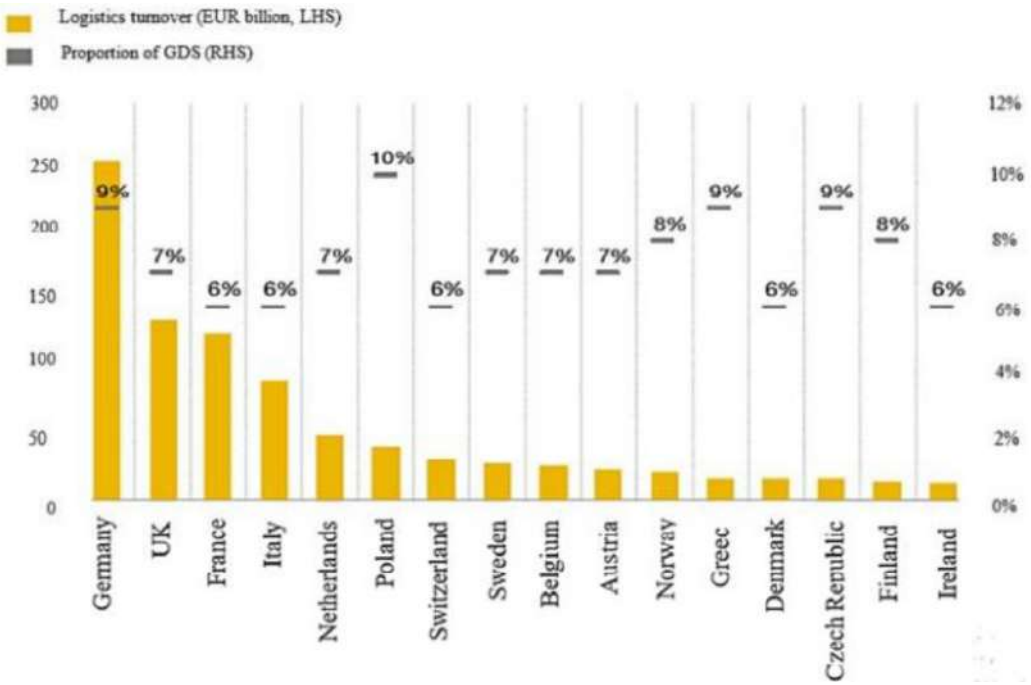


Рис. 1. Доля логістики в ВВП різних країн

Високі показники індексу LPI розвинених країн в останнє десятиліття обумовлені міжнародним, що швидко розширюється ринком транспортно-логістичних послуг, особливо 3PL-5PL провайдерів, що створило передумови для утворення найбільших транснаціональних логістичних компаній та корпорацій особливо у США та країнах Західної Європи. Про це свідчать та дані про питому вагу та обсяг логістичного сектора у ВВП окремих країн Європи представлені на рис. 1.

Так, частка сектора логістики коливається в широкому діапазоні від 6 % в Італії, Франції, Швейцарії, Данії та Ірландії, до 9–10 % Польщі, Німеччини, Чехії та Греції [17]. Європейський логістичний ринок складає близько 600 мільярдів євро, де частка Німеччини становить близько 30 %. До 2030 року уряд Німеччини витрачав

у середньому 15 мільярдів євро на рік на транспортну інфраструктуру. Постійне вдосконалення логістичної системи та використання високоефективних інноваційних рішень у цій області допомагають утримувати витрати на логістику в Німеччині на 70 % нижче, ніж в інших країнах, і займати 1-е місце у світі індексу ефективності логістики.

Численні регіональні та національні структури співробітництва, а також логістичні мережі забезпечують високоефективні транспортні зв'язки у країні. Така взаємодія забезпечується використанням сучасних інформаційних технологій та системи розподільчих центрів, які з'єднані між собою швидкими прямими зв'язками. Ефективність розподільчої системи країни забезпечується центрами підтримки вантажів, так званими вантажними селами GVZ (Güterverkehrszentren), створеними урядовими органами спільно з керівництвом логістичної галузі. Вони функціонують як регіональні вузли з доступом до мереж дальнього зв'язку та місцевих пунктів доставки вантажів, надаючи при цьому та такі послуги як митне оформлення, обслуговування транспорту, безпеку та ін.

У Німеччині контролюється рівень запасів у розподільчих центрах, шляхом ретельної організації та управління закупівлями матеріальних ресурсів, їх транспортуванням та часом знаходження на складах. В останні роки широко почали використовувати інтелектуальні транспортні засоби майбутнього (Smart Truck), що дозволяють розвивати систему динамічного планування маршрутів, радіочастотну ідентифікацію для автоматичного контролю навантаження (RFID), глобальне позиціонування (GPS), телематику та ін.

У комплексі це сприяє скороченню викидів в атмосферу, економії витрати палива, а також дозволяє мати необхідні дані, зібрані (Smart Sensor) як реального часу. Швидкими темпами розвивається і польський ринок логістики, є найбільшим у Європі. Як свідчать дані рис. 1.2 частка логістики у ВВП Польщі становить близько 10 %. Вищесказане свідчить про розвиток логістики не лише у Європі, але й на інших континентах. Вона є досить молодим і бурхливо розвивається у так званому інтегральному логістичному ланцюгу: «закупівлі – виробництво (послуги) – розподіл», що сприяє розвитку економічного потенціалу будь-якої країни та організації.

Глобалізація світової економіки, розширення міжнародного співробітництва та посилення ринкової конкуренції поставили питання про розвиток логістичної інфраструктури, інформаційних та телекомунікаційних систем, з метою організації та управління матеріальними потоками між континентами, країнами, окремими регіонами та підприємствами. Як показав досвід останніх двох десятиліть, вирішення цієї проблеми лежить у розробці та розвитку концепції інтегрованої логістики. Вона дозволяє комплексно координувати всі види потоків, що послідовно проходять через стадії закупівлі (заготівлі), зберігання, переміщення ресурсів та готової продукції від їх джерел до кінцевого споживача на міжнародному, міжрегіональному, галузевому та міжгалузевому рівнях з метою задоволення потреб клієнтів як товарів та послуг, а також максимізації загального синергетичного ефекту.

На ефективність впровадження інтегральної логістики істотно вплинула можливість контролю та управління рухом матеріальних потоків у реальному масштабі часу в регіонах віддаленого доступу через інформаційні системи зв'язку, наприклад, супутникові телекомунікаційні системи. Трансформація сфери управління логістикою, що відбувається і швидкість практики, що змінюється в цій галузі, сприяли створення умов для формування нових наукових уявлень про економічні процеси та категорії в понятійному апараті логістики. Аналіз управління логістичними витратами виробництва показує, що основні шляхи зниження витрат зосереджено в організації матеріальних потоків на різних стадіях його руху. За експертними оцінками найбільша питома вага резервів щодо зниження витрат під час руху матеріального потоку, лежить у сфері постачання (близько 50 %), збуту (приблизно 40 %) та виробництва (10 %). Тому для скорочення витрат та підвищення конкурентоспроможності товарів та послуг слід проводити постійний та наскрізний моніторинг матеріального потоку.

Висновки. На завершення, Україна досягла значного прогресу в розвитку своєї транспортної інфраструктури протягом багатьох років, пропонуючи різні види транспорту, доступні для сполучення різних регіонів країни. Однак транспортна система стикається з різними проблемами, включаючи застарілу інфраструктуру, недостатнє фінансування та брак сучасного обладнання. Уряд ініціював різні реформи, спрямовані на модернізацію транспортної системи, такі як залучення приватних інвестицій та впровадження нових правил для забезпечення безпеки. Незважаючи на ці проблеми, транспортна система залишається життєво важливим каталізатором економічного розвитку в Україні. Найбільш перспективним сегментом ринку транспортно-логістичних послуг для України може стати ринок термінової доставки до призначеного часу (just-in-time delivery). Цей сегмент активно розвивається у всьому світі: за такої організації послуг виробляється найбільша додана вартість.

Список використаної літератури

1. National Transport Strategy of Ukraine 2030. URL: https://mtu.gov.ua/files/for_investors/230118/National%20Transport%20Strategy%20of%20Ukraine.pdf

2. Fesovets O. / O. Fesovets., O. Strelko, Yu. Berdnychenko. Transport Means: Sustainability: Research and Solutions : Proceedings of 23rd International Scientific Conference (October 02 – 04, 2019, Palanga, Lithuania). – Kaunas : Kaunas University of Technology. 2019. Part I. Pp. 381–386.

3. Problems and perspectives of the development of transport logistics in Ukraine under the conditions of marital state / Maliuta, L., Rudan, V., Balushevskyj, K. *Economic Analysis*. 2023. №33. Pp. 153–164. DOI: 10.35774/econa2023.03.153

4. Мандра В. В. Аналіз світового досвіду управління транспортно-логістичним центром. Економічний аналіз : зб. наук. праць. Тернопіль : Видавничо-поліграфічний центр Тернопільського національного економічного університету «*Економічна думка*». 2016. Том 24. № 2. С. 92–97.

5. Shevchuk Olesia, Hayvanovych Nataliya. Current state, problems and prospects of maritime cargo transportation development in ukraine and the world. *Ekonomichnyy visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrayiny* «*Kyyivs'kyy politekhnichnyy instytut*». 2023. DOI: 10.32782/2307-5651.25.2023.10

6. Karas O. Strategic Directions For The Design, Development, and Expansion of Transport Infrastructure in Ukraine. *Science and Innovation*. 2024. №15(6). Pp. 23–32. https://doi.org/10.15407/scine15.06.023

7. Richert M., Dudek M. Risk mapping: ranking and analysis of selected, key risk in supply chains. *Journal of Risk and Financial Management*. 2023. №16(2). P. 71. https://doi.org/10.3390/jrfm16020071

8. Гринів Н. Т., Равліковська А. А. Перебудова логістики в умовах воєнного стану в Україні. Академічні візії. 2022. №13. https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/84

9. Кузьменко А. В. Досвід та закономірності формування світової транспортно-логістичної інфраструктури. *Науковий огляд*. 2015. № 7 (17). С. 5–18.

10. Тарнавська Н. П., Сивак Р. Б. Організаційні та інфраструктурні передумови створення міжнародного логістичного центру. *Бізнес–Інформ*. 2013. № 13. С. 29–35.

11. Пасічник А. М., Кутирєв В. В. Світовий досвід створення транспортно-логістичної інфраструктури стан та перспективи застосування в Україні. Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник / ДВНЗ «ДонНТУ» АДІ. Горлівка. 2011. № 2(13). С. 121–128.

12. Полякова О. М., Шраменко О. В. Сучасні тенденції розвитку транспортно-логістичної інфраструктури в Україні і світі. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2017. № 58. с. 126–134.

13. Petrukha S. V., Petrukha N. M., Hudenko O. D., Alekseienko N. M., Bondarenko D. V. Sectoral Shifts and a Trajectory Oftransformation of the Agrarian Sector Underthe Conditions of Paradigmization of Theconcept of Sustainable Development of Therural Economy. *MODERN ASPECTS OF SCIENCE. 10-th volume of the international collective monograph*. Praha, Czech Republic: Vědecké perspektivy. 2021. P. 135–169. URL: http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/monography-10.pdf

14. Petrukha N., Petrukha S., Miakota R. Debt Policy in the Conditions of the War Economy and Post-War Recovery. *Transformatsiia ekonomichnoi systemy v umovakh informatsiino-tekhnolohichnykh vyklykiv. Ryha, Latviia : Izdevnieciba "Baltija Publishing"*. 2024. P. 87–107 DOI: https://doi.org/10.30525/978-9934-26-437-5-5 URL: http://www.baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/467/12558/26248-1

15. "Ukraine: Railway System Modernization". European Bank for Reconstruction and Development. Retrieved 15 March 2023, from https://www.ebrd.com/ukraine-railway-systemmodernisation.html

16. United Nations Development Program in Ukraine. (2024). Express assessment of the impact of the war on micro, small and medium enterprises in Ukraine. Retrieved from https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2024-10/UA_Rapid_Assessment_of_War_on_MSMEs_in_Ukraine_0.pdf

References

1. National Transport Strategy of Ukraine 2030. URL: https://mtu.gov. ua/files/for_investors/230118/National%20Transport%20Strategy%20of%20Ukraine.pdf [in Ukrainian].

2. Fesovets O. Container transportation by rail transport within the context of Ukraine's European integration / O. Fesovets., O. Strelko, Yu. Berdnychenko // Transport Means: Sustainability: Research and Solutions : Proceedings of 23rd International Scientific Conference (October 02 – 04, 2019, Palanga, Lithuania). – Kaunas: Kaunas University of Technology, 2019. – Part I. – pp. 381–386. [in Ukrainian].

3. Maliuta, Liudmyla & Rudan, Vitalii & Balushevskyj, Kostyantyn. (2023). Problems and perspectives of the development of transport logistics in Ukraine under the conditions of marital state. Economic Analysis. 33. 153–164. 10.35774/econa2023.03.153. [in Ukrainian].

4. Mandra V. V. (2016) Analiz svitovogho dosvidu upravlinnja transportno-loghistychnym centrom [Analysis of world experience in transport and logistics center management]. Ekonomichnyj analiz : zb. nauk. pracj. Ternopilj : Vydavnycho-polighrafichnyj centr Ternopiljsjkogho nacionaljnogho ekonomichnogho universytetu "Ekonomichna dumka",vol 24, no. 2, pp. 92–97. [in Ukrainian].

5. Shevchuk, Olesia & Hayvanovych, Nataliya. (2023). Current state, problems and prospects of maritime cargo transportation development in ukraine and the world. Ekonomichnyy visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrayiny "Kyyivs′kyy politekhnichnyy instytut". DOI: 10.32782/2307-5651.25.2023.10. [in Ukrainian].

6. Karas O. (2024). Strategic Directions For The Design, Development, and Expansion of Transport Infrastructure in Ukraine. Science and Innovation, 15(6), 23–32. https://doi.org/10.15407/scine15.06.023

7. Richert, M., & Dudek, M. (2023). Risk mapping: ranking and analysis of selected, key risk in supply chains. Journal of Risk and Financial Management, 16(2), 71. https://doi.org/10.3390/jrfm16020071

8. Hryniv, N. T. & Ravlikovska, A. A. (2022). Perebudova lohistyky v umovakh voiennoho stanu v Ukraini [Reconstruction of logistics in conditions of marital state in Ukraine]. Akademichni vizii. (13). https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/84 [in Ukrainian]

9. Kuzjmenko A. V. (2015) Dosvid ta zakonomirnosti formuvannja svitovoji transportno-loghistychnoji infrastruktury [Experience and regularities of the formation of the world transport and logistics infrastructure]. Naukovyj oghljad, no 7(17), pp. 5 – 18. [in Ukrainian]

10. Tarnavsjka N. P., Syvak R. B. (2013) Orghanizacijni ta infrastrukturni peredumovy stvorennja mizhnarodnogho loghistychnogho centru [Organizational and infrastructure prerequisites for the creation of an international logistics center]. Biznes–Inform, no 13, pp 29–35. [in Ukrainian]

11. Pasichnyk A. M., Kutyrjev V. V. (2011) Svitovyj dosvid stvorennja transportno-loghistychnoji infrastruktury stan ta perspektyvy zastosuvannja v Ukrajini [World experience of creation of transport and logistics infrastructure, state and prospects of application in Ukraine]. Visti Avtomobiljno-dorozhnjogho instytutu: naukovo-vyrobnychyj zbirnyk, no 2(13), pp. 121 – 128. [in Ukrainian]

12. Poljakova O. M., Shramenko O. V. (2017) Suchasni tendenciji rozvytku transportno-loghistychnoji infrastruktury v Ukrajini i sviti [Modern trends in the development of transport and logistics infrastructure in Ukraine and in the world]. Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti, no 58, pp. 126–134. [in Ukrainian]

13. Petrukha S. V., Petrukha N. M., Hudenko O. D., Alekseienko N. M., Bondarenko D. V. Sectoral Shifts and a Trajectory Oftransformation of the Agrarian Sector Underthe Conditions of Paradigmization of Theconcept of Sustainable Development of Therural Economy. MODERN ASPECTS OF SCIENCE. 10-th volume of the international collective monograph. Praha, Czech Republic: Vědecké perspektivy, 2021. P. 135–169. URL: http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/monography-10.pdf

14. Petrukha N., Petrukha S., Miakota R. Debt Policy in the Conditions of the War Economy and Post-War Recovery. Transformatsiia ekonomichnoi systemy v umovakh informatsiino-tekhnolohichnykh vyklykiv. Ryha, Latviia : Izdevnieciba “Baltija Publishing”, 2024. S. 87–107 DOI: https://doi.org/10.30525/978-9934-26-437-5-5 URL: http://www.baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/467/12558/26248-1

15. “Ukraine: Railway System Modernization”. European Bank for Reconstruction and Development. Retrieved 15 March 2023, from https://www.ebrd.com/ukraine-railway-systemmodernisation.html

16. United Nations Development Program in Ukraine. (2024). Express assessment of the impact of the war on micro, small and medium enterprises in Ukraine. Retrieved from https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2024-10/UA_Rapid_Assessment_of_War_on_MSMEs_in_Ukraine_0.pdf

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 20.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 62-83:621.3 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.12

І. М. ЗАДОРОЖНЯ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації
Донбаська державна машинобудівна академія
ORCID: 0000-0002-7822-3517

М. О. ЗАДОРОЖНІЙ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації
Донбаська державна машинобудівна академія
ORCID: 0000-0003-0957-9998

УДОСКОНАЛЕННЯ ДИНАМІКИ В ЕЛЕКТРОПРИВОДІ ЗА УМОВ ДОДАТКОВИХ ЗВОРОТНИХ ЗВ'ЯЗКІВ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ЕФЕКТУ РЕЗОНАНСНОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ

В роботі розглянуто актуальну задачу визначення оптимальних параметрів електромеханічних систем технологічних машин для вдосконалення їх динаміки за критерієм мінімуму коливальності перехідних процесів. Показано, що параметри визначаються закономірностями електромеханічного взаємозв'язку, що дозволяє використовувати безпосередньо електропривод в якості динамічного демпферу пружних механічних коливань.

Традиційні методи синтезу орієнтовані на використання класичних оптимізаційних алгоритмів, що спрямовані на мінімізацію реакції електроприводу при дії пружних коливань. Фокус досліджень роботи зосереджений на тому, що електромеханічні системи необхідно розглядати з позицій взаємодії коливань в електромагнітній та механічній підсистемах електроприводу.

Згідно закономірностям ефекту резонансної електромеханічної взаємодії процесів у електромагнітній та механічній підсистемах приводу пропонується використовувати узагальнені показники. Дослідження доводить, що при оптимізації параметрів електроприводів за критерієм мінімуму коливальності основних координат налаштування системи автоматичного керування потрібно виконувати з урахуванням ефектів резонансної електромеханічної взаємодії при введенні додаткових зворотних зв'язків.

Отримав подальший розвиток метод синтезу електроприводу з активним демпфуванням пружних механічних коливань, що досягається вибором відповідного співвідношення параметрів додаткового зворотного зв'язку за швидкістю електродвигуна за умов резонансної електромеханічної взаємодії.

Реалізація запропонованих оптимальних розрахункових співвідношень для налаштування системи автоматичного керування електроприводом передбачає компенсацію впливу пружних сил інерційними, що може бути рекомендовано для використання в інженерній практиці при проєктуванні електроприводів технологічних машин.

Ключові слова: *електропривод, електромеханічна система, пружні механічні коливання, динамічні навантаження, демпфування, двомасова система, система автоматичного керування, додатковий зворотний зв'язок, взаємозв'язок, взаємодія, узагальнені показники.*

I. M. ZADOROZHNIA
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Electromechanical Automation Systems
Donbass State Engineering Academy
ORCID: 0000-0002-7822-3517

M. O. ZADOROZHNII
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Electromechanical Automation Systems
Donbass State Engineering Academy
ORCID: 0000-0003-0957-9998

© Задорожня І. М., Задорожній М. О., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

IMPROVEMENT OF DYNAMICS IN ELECTRIC DRIVES UNDER CONDITIONS OF ADDITIONAL FEEDBACK LOOPS WHEN IMPLEMENTING THE EFFECT RESONANT ELECTROMECHANICAL INTERACTION

The decision of actual problem of determining the optimal parameters of electromechanical systems of technological machines for improving their dynamics according to the criterion of minimum oscillation of transient processes. It is shown that the parameters are determined by the laws of electromechanical interaction, which allows the direct use of the electric drive as a dynamic damper of elastic mechanical vibrations.

Traditional synthesis methods focus on the use of classical optimization algorithms aimed at minimizing the response of the electric drive under the action of elastic vibrations. The focus of the research is on the fact that electromechanical systems must be considered from the perspective of the interaction of vibrations in the electromagnetic and mechanical subsystems of the electric drive.

According to the regularities of the resonance effect of electromechanical interaction of processes in the electromagnetic and mechanical subsystems of the drive, it is proposed to use generalized indicators. The study proves that when optimizing the parameters of electric drives according to the criterion of minimum oscillation of the main coordinates of the automatic control system,it is necessary to take into account the effects of resonant electromechanical interaction when introducing additional feedback.

The method of synthesizing an electric drive with active damping of elastic mechanical vibrations has been further developed. This is achieved by selecting the appropriate ratio of additional feedback parameters for the speed of the electric motor under conditions of resonant electromechanical interaction.

The proposed optimal calculated ratios for tuning the automatic control system of the electric drive, which provide for compensation of the influence of elastic forces by inertial forces, can be recommended for use in engineering practice when designing electric drives for technological machines.

Key words: *electric drive, electromechanical system, elastic mechanical oscillations, dynamic loads, damping, two-mass system, automatic control system, additional feedback, relationship, interaction, generalized indicators.*

Постановка проблеми

Наявність пружних механічних коливань, що істотно впливають на динамічні режими функціонування електроприводів (ЕП) технологічних машин різних галузей промисловості, які супроводжуються виникненням додаткових навантажень на елементи виконавчих механізмів, спричиняють зниження довговічності та точності позиціонування, не зважаючи на постійне вдосконалення елементної бази систем керування, суттєві досягнення в сфері обчислювальної та вимірювальної техніки на тлі революційних змін в ІТ-секторі, залишаються нагальною проблемою.

З аналізу численних робіт з дослідження динаміки ЕП з пружним зв'язком ще на початковому етапі вдосконалення характеристик і функціональних можливостей ЕМС виявилися і виявляються специфічні властивості та негативні якості елементів систем [1–8]. Наявність коливальних процесів в електромеханічних системах (ЕМС), які є причиною прояву додаткових динамічних навантажень, надлишкогого теплового завантаження електричного обладнання, ускладнює технічні можливості досягнення високої точності руху, що є критично важливим для сучасних технологічних машин у галузях обробки матеріалів, робототехніки, пакувального обладнання та автоматизованих виробничих комплексів.

Пікові динамічні навантаження в перехідних процесах багаторазово перевищують статичні, знакозмінні складові моментів сил пружності скорочують термін служби деталей передач за зносом та витривалістю. Пружні механічні коливання є причиною погіршення показників точності регулювання координат ЕП, а також невідповідності дійсних умов руху робочого органу заданим законами. При впливі моменту електродвигуна на пружну механічну підсистему ЕП також виникають коливальні процеси, які сприяють збільшенню максимальних навантажень ЕП, при цьому рішення з обмеження динамічних навантажень шляхом коригування саме швидкісних режимів машини призводить до істотного зниження продуктивності.

Безумовно при проектуванні та експлуатації ЕП технологічних машин важливим завданням є визначення фактичних динамічних навантажень електричного та механічного обладнання, що потребує врахування взаємозв'язку й взаємного впливу на динаміку ЕМС пружних коливань у механічній підсистемі (МП) та процесів в електромагнітній підсистемі (ЕМП) відносно високої швидкодії [1, 2, 9].

Використання ж специфічних особливостей електромеханічної взаємодії підсистем ЕП дозволяє досягати граничного ступеня демпфування пружних коливань [3]. При цьому необхідно в рамках проєктних процедур спочатку приділити увагу визначенню структури та параметрів ЕП, вибору налаштувань системи керування, а далі здійснити оптимізацію електромеханічного зв'язку, що забезпечить ефект посилення демпфування пружних коливань та істотного зниження рівня динамічних навантажень і часу їх дії на електричне і механічне обладнання ЕП. Слід зауважити, що впливати на коливальність процесів можливо шляхом вибору відповідної динамічної жорсткості механічної характеристики ЕП, а також за рахунок формування процесів електромеханічної взаємодії з компенсацією дії пружних сил інерційними [10].

Таким чином, проблема удосконалення динамічних якостей ЕП технологічних машин за рахунок мінімізації впливу пружних механічних коливань, що зумовлена сучасними вимогами до підвищення продуктивності, енергоефективності та надійності промислових систем, не втрачає свої актуальності актуальною та вимагає подальших досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Численні дослідження в контексті реалізації можливостей щодо зменшення впливу пружних механічних коливань на процеси в системі ЕП демонструють наявність різни підходів. Загалом сформувалися та інтенсивно розвиваються напрямки оптимізації параметрів ЕП з метою мінімізації коливальності для випадків дії пружних механічних коливань як зовнішнього збурення за навантаженням, так і реалізації демпфуючої дії електромеханічного зв'язку при взаємодії коливань пружної МП та ЕП.

В рамках першого напрямку ЕП розглядається як єдина система без урахування взаємовпливу механічної та електромагнітної підсистем, при цьому для отримання бажаних характеру протікання перехідних процесів та показників якості застосовуються традиційні методи синтезу [5–8]. При цьому, наприклад, в системах підпорядкованого регулювання (СПР) послідовної корекції та системах регулювання паралельної корекції параметрів ЕП з пружними механічними ланками використання типових критеріїв налаштування регуляторів при сильному електромеханічному зв'язку на «модульний», «лінійний» і «симетричний» оптимуми не є можливим. При інженерних оцінках оптимальності перехідних процесів в теорії автоматичного управління існує метод стандартних форм характеристичних поліномів. Перехідний процес для систем з передавальними функціями, що не мають нулів, матиме заздалегідь задану (бажану, стандартну) форму, що визначається стандартними коефіцієнтами характеристичного полінома, які однозначно декларуються розподілом коренів. Подібний метод простий, обчислювальні процедури для якого легко алгоритмізуються при застосуванні програмних засобів, але він не враховує особливості, що кардинально впливають на властивості ЕП. Зокрема, в більшості випадків метод не забезпечує процесів в складових (окремих) підсистемах ЕМС необхідної якості. Слід додати, що прийнятий розподіл коренів з тих чи інших міркувань при синтезі не пов'язаний з фізичними властивостями пружного об'єкта, при цьому виключаються специфічні (особливі) ефекти процесів взаємодії підсистем і характер впливу на процеси виду зв'язку підсистем.

В рамках другого напрямку ЕП розглядається як динамічний демпфер пружних механічних коливань, проте задача мінімізації динамічних навантажень має розв'язок лише для обмеженого класу технологічних машин, рекомендовані залежності є громіздкими, а заявлені співвідношення характеризуються істотними числовими обмеження, що не дозволяє вважати запропоновані налаштування для систем автоматичного керування (САК) ЕП універсальними [8, 11–13].

Формулювання мети дослідження

Дієвим методом синтезу параметрів ЕМС для забезпечення бажаних динамічних властивостей технологічних машин є метод, що передбачає використання демпфувальних можливостей безпосередньо ЕП за умов реалізації ефектів резонансної електромеханічної взаємодії процесів.

Метою дослідження є аналіз процесів демпфування пружних коливань в ЕМС за умов введення додаткового зворотного зв'язку за похідною від швидкості двигуна (гнучкий зворотний зв'язок) для СПР та визначення співвідношень параметрів для САК, що забезпечать формування оптимальних перехідних процесів за критерієм мінімуму коливальності.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для подальшого дослідження розглядається ЕП з СПР [7, 8, 12] з послідовною корекцією параметрів, відповідно до якої складено узагальнену структурну схему двомасової ЕМС [14], яка відображає властивості ЕП з лінійною механічною характеристикою і фізичні закономірності реальних процесів на основній частоті резонансної електромеханічної взаємодії та представлена на рис. 1 з позначеннями у відносній формі параметрів (T_{M1} – механічна стала часу електродвигуна; T_{M2} – механічна стала часу механізму; C_{12} – значення коефіцієнту жорсткості пружної ланки; W_{KCT} – передавальна функція контуру регулювання струму; W_{333} – передавальна функція зворотного зв'язку за похідною від швидкості двигуна; $W_{PШ}$ – передавальна функція контуру регулювання швидкості; $\gamma = (J_1 + J_2)/J_1 = (T_{M1} + T_{M2})/T_{M1}$ – коефіцієнт розподілу наведених моментів інерції електродвигуна J_1 та механізму J_2 (інерційних мас); $\Omega_{12} = \sqrt{C_{12}(J_1 + J_2)/(J_1 \cdot J_2)}$ – частота вільних коливань двомасової механічної частини ЕП).

На структурній схемі рис. 1 показано, що зворотний зв'язок уводиться або на вхід регулятора швидкості (пунктирна лінія), що дозволяє зберігати переваги СПР за обмеженням струму якоря шляхом обмеження вхідного сигналу регулятора швидкості [10], або на вхід контуру регулювання струму якоря, що більш доцільно з точки зору забезпечення високої швидкодії й фізичного змісту введення в алгоритм регулювання похідною – координати першої маси $d\omega_1/dt$ пропорційної струму якоря двигуна.

Передавальні функції за керівним і збурювальним впливами отримані на підставі структурної схеми, представленої на рис. 1, у відносній формі запису параметрів при реалізації гнучкого зворотного зв'язку

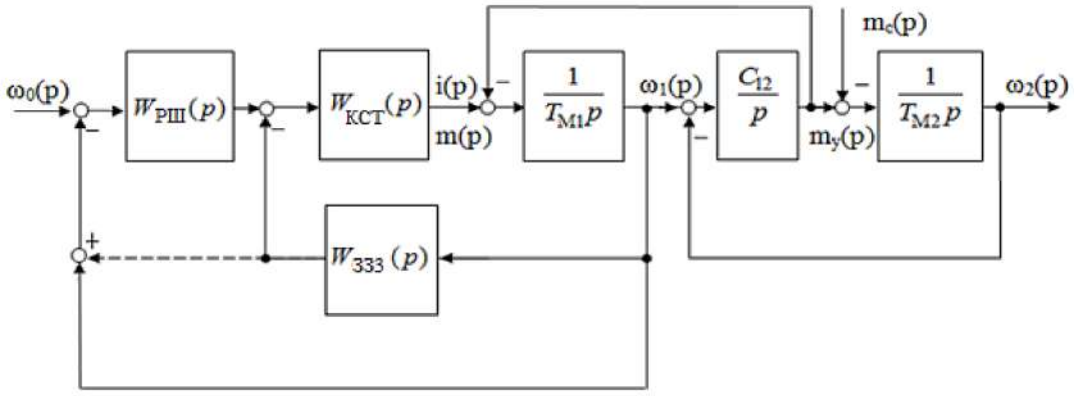


Рис. 1. Структурна схема СПР ЕП із додатковим зворотним зв'язком за похідною від швидкості двигуна у відносних одиницях

($W_{333}(p) = T_{01}p$) одержують із допущенням, що контур регулювання струму налаштований на граничну швидкодію з компенсацією впливу проти ЕРС двигуна, а ЕМП є інерційною ланкою з еквівалентною сталою часу $T_{\mu Ш}$ для наступних координат:

$$\left.\begin{aligned} W_{11}(p) &= \frac{\omega_2(p)}{\omega_0(p)} = \frac{K_{\text{РШ}}}{Q(p)}, \qquad W_{13}(p) = \frac{m_y(p)}{m_C(p)} = \frac{M(p)}{Q(p)}, \\ W_{12}(p) &= \frac{m(p)}{m_C(p)} = \frac{K_{\text{РШ}}}{Q(p)}, \qquad W_{14}(p) = \frac{\omega_2(p)}{m_C(p)} = \frac{N(p)}{Q(p)}. \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

де $Q(p)$ – характеристичний поліном

$$Q(p) = T_{M1E}T_{M2}T_{\mu Ш}T_C p^4 + T_{M1E}T_{M2}T_C p^3 + (T_{M1E}T_{\mu Ш} + T_{M2}T_{\mu Ш} + K_{РШ}T_{M2}T_C)p^2 + (T_{M1E} + T_{M2})p + K_{РШ}, \tag{2}$$

де прийнято:

$T_{M1E} = T_{M1} + T_{01}$;

T_{01} – стала часу гнучкого зворотного зв'язку;

$T_C = 1/C_{12}$ – стала часу пружної ланки.

$K_{РШ}$ – коефіцієнт підсилення регулятора швидкості;

$T_{\mu Ш}$ – стала часу контуру регулювання швидкості.

В характеристичному рівнянні (2) можна представити зміну (корекцію) сталої часу електродвигуна новим значенням коефіцієнта розподілу інерційних мас:

$$\gamma_k = \frac{\left[(T_{M1} + T_{01}) + T_{M2}\right]}{T_{M1} + T_{01}} = \frac{T_{M1E} + T_{M2}}{T_{M1E}}. \tag{3}$$

В цьому випадку з урахуванням рівняння (3) і використанням форми нормування [10] узагальнене характеристичне рівняння набуває вигляду:

$$Q_4(p) = \gamma_k K_B T_y^4 p^4 + 2\gamma_k \xi_Д \sqrt{K_B} T_y^3 p^3 + \gamma_k (K_B + 2) T_y^2 p^2 + 2\gamma_k \xi_Д \sqrt{K_B} T_y p + 1, \tag{4}$$

де K_B – коефіцієнт електромеханічної взаємодії; $\xi_Д$ – коефіцієнт демпфування ЕМП; $T_y = 1/W_{12}$ – стала часу пружних механічних коливань.

Характеристичне рівняння (4) описує динамічні властивості ЕМС аналогічно уніфікованій (типовій) структурі (5) [10]

$$Q(p) = \gamma K_B T_y^4 p^4 + 2\gamma \xi_Д \sqrt{K_B} T_y^3 p^3 + \gamma(1 + K_B) T_y{}^2 p^2 + 2\gamma \xi_Д \sqrt{K_B} T_y\, p + 1 = 0. \tag{5}$$

При цьому значенням коефіцієнта розподілу інерційних мас γ_k (3) в результаті корекції за рахунок введення додаткового зворотного зв'язку за швидкістю двигуна буде меншим від колишнього, фактичного:

$$\gamma < \gamma_k, \tag{6}$$

де $\gamma = (T_{M1} + T_{M2})/T_{M1}$ – фактичний коефіцієнт.

Отже, необхідна комплектація коренів характеристичного рівняння ЕМС із граничним (максимальним) демпфуванням для випадку, коли значення фактичного коефіцієнта розподілу інерційних мас перевищує оптимальне (за мінімумом коливальності):

$$\gamma_k < \gamma_0, \tag{7}$$

досягається корекцією шляхом введення гнучкого зворотного зв'язку за ω_1 зі сталою часу, яка визначається з умови (3) для $\gamma_k < \gamma_0$, при цьому стала часу зворотного зв'язку повинна мати значення:

$$T_{01} = T_{M1}\frac{\gamma - \gamma_0}{\gamma_0 - \gamma}. \quad (8)$$

Висновки

1. Вмикання коригуючих пристроїв або створення додаткових зворотних зв'язків дозволяє суттєво вплинути на якісні показники САК та зменшити чи повністю виключити вплив ланок, що погіршують функціонування ЕП, тому в контексті розширення можливостей реалізації різноманітних алгоритмів регулювання доречним і практичним рішенням є введення для ЕМС технологічних машин зворотного зв'язку за похідною від швидкості двигуна ω_1 (гнучкий зворотний зв'язок).

2. Введення зворотного зв'язку за похідною швидкості від двигуна приводить до ефекту еквівалентного зменшення коефіцієнта розподілу інерційних мас γ, що дає змогу застосувати таку корекцію для ЕП з коефіцієнтом розподілу інерційних мас $\gamma > \gamma_0$.

3. Запропоноване для практики налаштування ЕП з СПР за умов зворотного зв'язку за похідною швидкості від двигуна аналітичне співвідношення (8) враховують ефект резонансної електромеханічної взаємодії підсистем за допомогою узагальнених параметрів K_B, $\xi_Д$, γ, при цьому всі параметри ЕМС перебувають у взаємозв'язку, що забезпечується коефіцієнтом розподілу інерційних мас γ, який і визначає оптимальні параметри ЕМС за критерієм мінімуму коливальності.

4. В інженерній практиці, якщо потрібно в ЕП технологічної машини з коефіцієнтом розподілу інерційних мас $\gamma = 9$ перехідний процес за пружним моментом наблизити до екстремальної кривої, що відповідає модульному оптимуму з коефіцієнтом демпфування $\xi = \sqrt{2}/2$, то відповідно до співвідношення, яке визначає екстремальне значення функції ступеня демпфувальної дії ЕП і характеризується логарифмічним декрементом загасання [10] оптимальне значення коефіцієнта розподілу інерційних мас становить $\gamma_0 = 3$. При цьому в процесі реалізації корекції із гнучким зворотним зв'язком за швидкістю двигуна ω_1 розрахункове значення сталої часу (8) становитиме , що цілком є практично здійсненим.

Список використаної літератури

1. Samuelsson O. Load modulation at two locations for damping of electromechanical oscillations in a multimachine system. *Power Engineering Society Summer Meeting 2000. IEEE*. 2000. Vol. 3, P. 1912–1917. doi: 10.1109/pess.2000.868826

2. Szabat K., Orłowska-Kowalska T. Vibration suppression in a two-mass drive system using PI Speed Controller and Additional Feedbacks. *Comparative Study IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2007. Vol. 54, Issue 2. P. 1193–1206.

3. Задорожня І. М. Аналіз показників якості процесів перетворення енергії в процесі демпфірування електроприводом коливань пружної механічної передачі / І. М. Задорожня, М. О. Задорожній // Технічна електродинаміка. 2020. № 1. С. 27–32. doi: https://doi.org/10.15407/techned2020.01.027

4. Олєйніков М. О. Система автоматичного керування електроприводом мостового крану з урахуванням пружних зв'язків. Електротехніка та електроенергетика. 2024. № 3. С. 25–35. https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-3-3

5. Pyatibratov G. Ya. On the Use of Electromechanical Systems for Limiting Dynamic Loads in Spring Mechanisms. *Russian Electrical Engineering*. 2018. Vol. 89, Issue 1. P. 36–41.

6. Blagodarov D. A., Kostin A. A., Reznikovskiy A. M., Safonov Yu. M., Chernikov S. Yu. Development of Control Systems of Electric Drives with Flexible Mechanics. *Russian Electrical Engineering*. 2015. Vol. 86, No. 1. P. 18–21.

7. Коцегуб П. Х. Синтез вентильних приводів постійного струму. Київ : ІЗМН, 1997. 124 с.

8. Толочко О. І. Аналіз та синтез електромеханічних систем зі спостерігачами стану: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Донецьк: Норд-Прес, 2004. 298 с.

9. Задорожня І. М. Аналіз умов демпфування коливань в двомасовому електроприводі на основі ефекту резонансної електромеханічної взаємодії з додатковими зворотними зв'язками / І. М. Задорожня, М. О. Задорожній // Вісник Херсонського національного технічного університету «ХНТУ». 2024. №2 (89). С. 20-26. doi https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.2

10. Задорожня І. М., Задорожній М. О. Оптимізація та взаємозв'язки параметрів двомасових електромеханічних систем [Електронний ресурс] : монографія. Електрон. текст. дані (4,5 Мб). Краматорськ : ДДМА, 2021.

11. Ковальов Ю. А. Пристрій зниження динамічних навантажень в приводі машин з пружиною кручення та вибір його параметрів / Ю. А. Ковальов, С. А. Плешко, Є. В. Лопухов // Вісник Хмельницького національного університету. Серія : Технічні науки. 2021. № 3 (297). С. 87–93. doi: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2021-297-3-87-93

12. Марущак Я. Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовним та паралельним керуванням. Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. 208 с.

13. Kuznetsov, B. I., Nikitina, T. B., Bovdui, I. V., Voloshko, O. V., Kolomiets, V. V., & Kobylianskiy, B. B. The method of limitation of dynamic loads of nonlinear electromechanical systems under state vector robust control. Electrical Engineering & Electromechanics, 2022, No. 2, pp. 3-10. doi: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.2.01

14. Попович М. Г., Борисик М. Г., Гаврилюк В. А. Теорія електроприводу. Київ : Вища шк., 1993. 494 с.

References

1. Samuelsson, O. (2000). Load modulation at two locations for damping of electromechanical oscillations in a multimachine system. *Power Engineering Society Summer Meeting. IEEE*, Vol. 3, P. 1912–1917. doi: 10.1109/pess.2000.868826

2. Szabat K., Orłowska-Kowalska T. (2007) Vibration suppression in a two-mass drive system using PI Speed Controller and Additional Feedbacks. *Comparative Study IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 54, Issue 2. P. 1193–1206.

3. Zadorozhniaia I.N., Zadorozhnii N.A. (2020) Analysis of quality indicators into the process of energy transformation during damping vibrations of elastic mechanical transmission by the drive / Tekhnichna elektrodynamika, no. 1, pp. 27–32. doi: https://doi.org/10.15407/techned2020.01.027

4. Olieinikov M. (2024). Automatic control system for the electric drive of an overhead crane considering elastic connections. Electrical Engineering and Power Engineering, (3), 25–35. doi:https://doi.org/10.15588/1607-6761-2024-3-3

5. Pyatibratov, G. (2018) On the Use of Electromechanical Systems for Limiting Dynamic Loads in Spring Mechanisms. *Russian Electrical Engineering*. Vol. 89, Issue 1. P. 36-41.

6. Blagodarov D., Kostin A., Reznikovskiy A., Safonov Yu. & Chernikov S. (2015) Development of Control Systems of Electric Drives with Flexible Mechanics. *Russian Electrical Engineering*. Vol. 86, No. 1. P. 18–21.

7. Kotsehub, P. (1997) *Syntez ventylnykh pryvodiv postiinoho strumu* [Synthesis of DC valve drives]. Kyiv : IZMN [in Ukrainian].

8. Tolochko, O. (2004) Analiz ta syntez elektromekhanichnykh system zi sposterihachamy stanu: navchalnyi posibnyk dlia studentiv vyshchykh navchalnykh zakladiv [Analysis and synthesis of electromechanical systems with state observers: a study guide for students of higher educational institutions]. Donetsk : Nord-Pres [in Ukrainian].

9. Zadorozhnia, I. & Zadorozhnii M. Analysis of the damping conditions of oscillations in a two-mass electric drive based on the effect of resonant electromechanical interaction with additional feedback. Visnyk KNTU, 2024. No 2 (89). P. 20–26. doi https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.2

10. Zadorozhnia, I. & Zadorozhnii M. (2021) *Optymizatsiia ta vzaiemozviazky parametriv dvomasovykh elektromekhanichnykh system* [Optimization and interrelations of parameters of two-mass electromechanical systems]. Kramatorsk : DDMA [in Ukrainian].

11. Kovalyov Y. A., Pleshko S. A., Lopukhov E. V. Dynamic load reduction device in machine drive with spring and selection of its parameters. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences, 2021, no. 3(297), pp. 87–93. doi: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2021-297-3-87-93

12. Marushhak, Ya.(2005) *Sintez elektromekhanichnikh sistem z poslidovnim ta paralel'nim keruvanniam* [Synthesis of Electromechanical systems with serial and parallel control]. L'viv, "L'vivs'ka politekhnika" Publ. [in Ukrainian].

13. Kuznetsov, B. I., Nikitina, T. B., Bovdui, I. V., Voloshko, O. V., Kolomiets, V. V., & Kobylianskiy, B. B. The method of limitation of dynamic loads of nonlinear electromechanical systems under state vector robust control. Electrical Engineering & Electromechanics, 2022, No. 2, pp. 3–10. doi: https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.2.01

14. Popovych, M., Borysyk, M. & Havryliuk, V. (1993) *Teoriia elektropryvodu* [Theory of electric drive]. Kyiv : Vyshcha shk. [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 26.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 22.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 677.072.6 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.13

О. В. ІЩЕНКО
доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри промислової фармації
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0002-9510-6005

Р. М. МОСКАЛЬ
аспірант кафедри хімічної технології та ресурсозбереження
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0009-0006-1004-5917

ТЕХНОЛОГІЇ ОДЕРЖАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО ПОСУДУ

Метою даної роботи було вивчення можливості створення біорозкладного посуду на основі кукурудзяного крохмалю та визначення оптимального методу його виробництва. Як полімерну композицію було обрано суміш кукурудзяного крохмалю та полівінілового спирту, з додаванням гліцерину в якості пластифікатора. Дослідження проводилися шляхом порівняння двох основних технологічних процесів, перший – лиття під тиском та другий – екструзії з подальшим пресуванням.

Експериментальна частина включала розробку складу полімерної композиції та одержання зразків за двома технологіями. Екструзію матеріалу здійснювали на одношнековому лабораторному екструдері (Brabender) та лиття на ливарній машині ТПА DE3330.Ф1. Після виготовлення готових виробів було проведено комплексне дослідження їхніх властивостей, зокрема сорбційних та фізико-механічних. Це дозволило оцінити міцність, стійкість до вологи та інші ключові характеристики, які є критичними для посуду на основі водорозчинного та природного полімерів.

Результати досліджень показали, що зразки, виготовлені методом лиття під тиском, мали значно кращі сорбційні та фізико-механічні властивості порівняно зі зразками, одержаними шляхом екструзії. Це свідчить про перевагу методу лиття під тиском для отримання високоякісних виробів з даної полімерної композиції.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше було проведено порівняльне дослідження впливу різних методів виготовлення на властивості екологічного посуду з кукурудзяного крохмалю. Це відкриває нові можливості для оптимізації виробничих процесів. Практична значимість дослідження полягає в розширенні асортименту екологічного посуду на сучасному ринку, пропонуючи новий, повністю біорозкладний продукт на основі доступної в Україні сировини.

Ключові слова: *лиття під тиском, екструзія, крохмаль, полівініловий спирт, одноразовий посуд.*

O. V. ISHCHENKO
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Industrial Pharmacy
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0002-9510-6005

R. M. MOSKAL
Postgraduate Student at the Department of Chemical Technologies
and Resource Saving
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0009-0006-1004-5917

TECHNOLOGIES FOR PRODUCING ECO-FRIENDLY TABLEWARE

The aim of this work was to study the possibility of creating biodegradable tableware based on corn starch and to determine the optimal method for its production. A mixture of corn starch and polyvinyl alcohol was selected as the polymer composition, with the addition of glycerin as a plasticizer. The research was conducted by comparing two main technological processes, the first being injection moulding and the second being extrusion followed by pressing.

The experimental part included the development of the polymer composition and the production of samples using two technologies. The material was extruded on a single-screw laboratory extruder (Brabender) and moulded on a DE3330. F1 injection moulding machine. After the finished products were manufactured, a comprehensive study of their properties, in particular sorption and physical-mechanical properties, was carried out. This made it possible to evaluate the strength,

© Іщенко О. В., Москаль Р. М., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

moisture resistance and other key characteristics that are critical for tableware based on water-soluble and natural polymers.

The results of the research clearly showed that the samples made by injection moulding had significantly better sorption and physical-mechanical properties compared to the samples obtained by extrusion. This indicates the advantage of the injection moulding method for obtaining high-quality products from this polymer composition.

The scientific novelty of the work lies in the fact that, for the first time, a comparative study was conducted on the influence of different manufacturing methods on the properties of eco-friendly tableware made from corn starch. This opens up new opportunities for optimising production processes. The practical significance of the study lies in expanding the range of eco-friendly tableware on the modern market by offering a new, fully biodegradable product based on raw materials available in Ukraine.

Key words: *injection molding, extrusion, starch, polyvinyl alcohol, disposable tableware.*

Постановка проблеми

Забезпечення екологічної безпеки є одним з найактуальніших викликів сучасності, де проблема забруднення навколишнього середовища побутовими відходами набула катастрофічних масштабів. Особливе місце серед них посідає пластиковий посуд, що виготовляється з невідновлюваної сировини – нафти. Деякі види цього пластику розкладаються протягом сотень років, перетворюючись на мікропластик, який проникає у ґрунт, воду та харчові ланцюги.

Одним із підходів до вирішення цієї проблеми є вторинна переробка полімерів, але навіть цей процес є ресурсомістким і вимагає спеціального обладнання. Усвідомлюючи всю гостроту ситуації, наукова спільнота активно працює над створенням інноваційних рішень, які могли б кардинально змінити ситуацію.

Ідея використання біорозкладного посуду, який є не просто альтернативою, а запорукою екологічного майбутнього. На відміну від традиційного пластику, такий посуд розкладається за значно коротший термін, повертаючись до природи без шкоди. Екологічний посуд – це не лише зручне рішення для повсякденного використання, а й свідомий крок назустріч збереженню нашої планети для майбутніх поколінь [1].

Біорозкладні вироби в теперішній час набули популярності. Термін придатності біорозкладних матеріалів, в умовах природного середовища та природного клімату, коливається від півтора місяця до трьох років. Поетапний перехід до виготовлення біорозкладної продукції вважається важливою соціально-відповідальною місією [2].

Одним із видів сировини для виробництва екологічного посуду, став крохмаль. Одноразовий посуд, отриманий з кукурудзяний крохмалю має одні з найвищих технічних характеристик, які зумовлені відсутністю шкідливих речовин, і простою утилізацією.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В останні роки дослідники зосередилися на біополімерах, таких як білки та вуглеводи для виробництва пластмас. Серед біополімерів більшу увагу приділено крохмалю через широку доступність і низьку вартість [3].

Нативний крохмаль не можна розглядати як термопластичний полімер, оскільки сильний міжмолекулярний водневий зв'язок запобігає плавленню [4]. Але при наявності пластифікаторів, міжмолекулярні зв'язки послаблюються, і крохмаль може розплавлятися при високій температурі під напругою зсуву [3].

Додавання пластифікаторів до крохмалю призводить до зменшення міжмолекулярних зв'язків, збільшення рухливості ланцюга, зниження температури склування, що покращує пластичність і розтяжність [5]. Але отримані матеріали на основі термопластичного крохмалю (ТПК) змінюють механічні властивості залежно від зміни відносної вологості зовнішнього середовища. Цей недолік обмежує використання матеріалів на основі ТПК, тому є актуальним модифікація крохмалю або створення полімерної композиції з використанням синтетичних полімерів, які забезпечать необхідні технологічні показники.

Відомі композиції ТПК з полікапролактоном, полімолочною кислотою та полівініловим спиртом (ПВС) [6, 7]. Введення ПВС у крохмаль покращує термічні та механічні властивості матеріалу і таким чином модифікує структуру полімеру як на молекулярному, так і на морфологічному рівні [4, 8].

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка складу та технології одержання екологічного посуду з полімерної композиції на основі крохмалю та полівінілового спирту.

Викладення основного матеріалу дослідження

Підготовка полімерної композиції. 1 етап підготовка крохмалю (Кр): 80 мас.ч. кукурудзяного крохмалю (10,3 % вологи) і 20 мас.ч. гліцерину (0,2 % вологи) змішували у міксері протягом 10 хв.

ІІ етап підготовка полівінілового спирту (ПВС): до 10 мас.ч. гліцерину додавали 35 мас.ч. води, Суміш перемішували при кімнатній температурі і під час перемішування додавали 55 мас.ч. ПВС. Розчин нагрівали до 85 °С протягом 30 хв.

Отриману суміш потім змішували з крохмалем у міксері при кімнатній температурі (24 °С). Полімерна композиція ПВС/Кр містили 10 г ПВС (кінцева концентрація 9,1 %) і 100 г крохмалю, вміст гліцерину 20 %. Усі композиції екструдували через одношнековий лабораторний екструдер (Brabender) та отримували стренгу. Температури формуючого інструменту та зони – 90, 120, 125 і 110 ºС, відповідно. Швидкість обертання шнеку до 30 об/хв.

Лиття підготовленої полімерної композиції на ливарній машині ТПА ДЕ3330.Ф1.

В роботі було проведено дослідження сорбційних властивостей матеріалів одержаних на основі композицій ПВС/Кр шляхом занурення зразків у дистильовану воду. Розрахунок сорбції (W) здійснювався гравіметричним методом за формулою:

$$W = \frac{(m_i - m_0)}{m_0} \cdot 100\ \%$$

де m_i – маса зразка у момент часу i, m_0 – початкова маса зразка.

В якості пластифікатора використовували гліцерин.

Результати досліджень

Отримали гранулу полімерної композиції ПВС/Кр (рис. 1, *а*), яку переробляли на екструдері (рис. 1 б) та ливарній машині й отримали вироби (рис. 1, *в*, *г*).

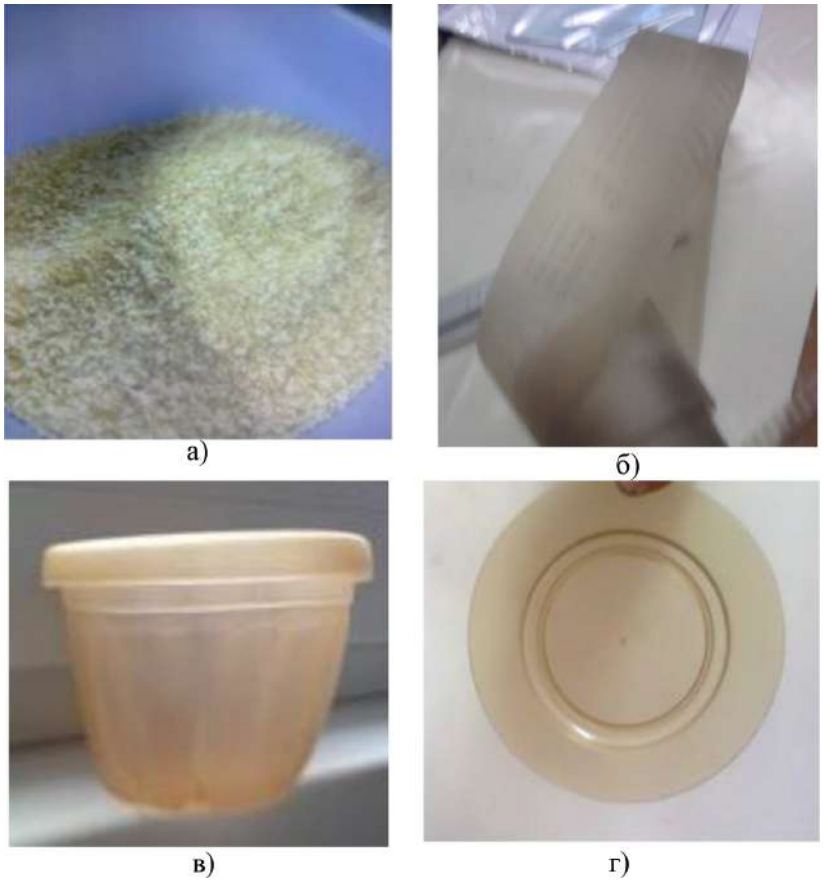


Рис. 1. Отримані вироби з полімерної композиції на основі кукурудзяного крохмалю та полівінілового спирту (*а*) – гранула; *б*) – плівка; *в*) – горщик; *г*) – тарілка)

Були отримані плоскі та об'ємні вироби за якими визначали формостійкість при вологості 60 % і температурі 24 °С протягом 24 годин, за цей час форма не змінилася.

На рис. 2 наведено залежність сорбції води для зразків на основі ПВС/Кр отриманих методом лиття під тиском та екструзії.

Як видно з рисунку, відсоток сорбції для зразків виготовлених методом лиття під тиском протягом перших 2,5 годин становить в межах від 1 до 3,8 % подальше перебування у воді призводить до збільшення сорбції води до 23 % через добу і це значення не змінювалося протягом тижня. Для зразків виготовлених методом екструзії спостерігається значна сорбція води першу годину дослідження. Вона зростає до 120 %, після чого маса зразка починає падати, і через 2,5 години від початку дослідження відсоток сорбції становить 74 %. При цьому зразок втрачає свою міцність і спостерігається відокремлення частинок матеріалу. Протягом доби матеріал суттєво розпадався, що унеможливило подальше спостереження.

Отже зразок отриманий методом лиття під тиском має у 53 рази менший відсоток сорбції ніж для зразків отриманих методом екструзії, а отже вибір методу переробки – методу литтям під тиском дозволяє зберігати при дії води стабільні розміри, що дає можливість виготовляти на основі композицій ПВС/Кр екологічнй посуд.

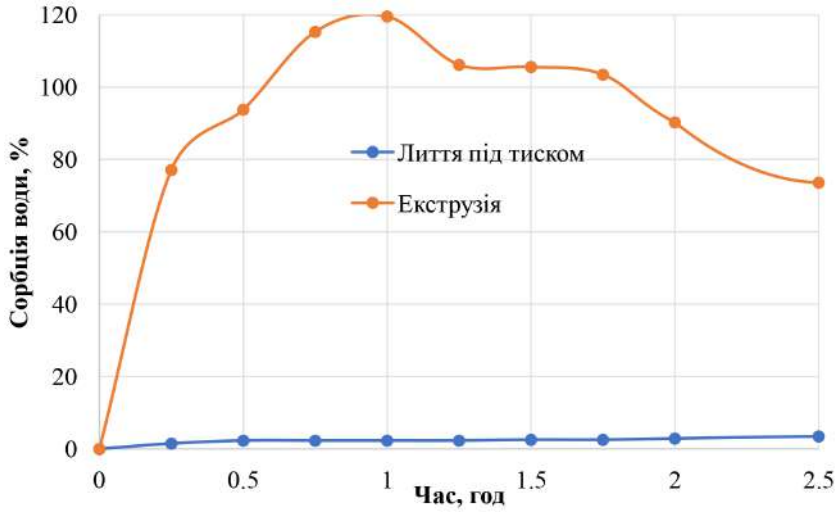


Рис. 2. Залежність сорбції води для зразків на основі ПВС/Кр отриманих методом лиття під тиском та екструзії

Дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів на основі ПВС/Кр виготовлених методом лиття під тиском та екструзії.

Для проведення досліджень використовували розривну машину Р5 за ISO 527-1 та ISO 527-2. Кількість випробовуваних зразків з кожної проби повинна бути не менше п'яти.

Зразки отримані методом екструзії та лиття під тиском були закопані на присадибній ділянці на глибину 10 см терміном 5 місяців. Після чого зразки були видалені з ґрунту та витерті сухими серветками. Всі зразки дослідили на фізико-механічні властивості.

На рис. 3 наведено залежність навантаження від деформації зразка з композиції на основі композиції ПВС/Кр виготовленого методом екструзії до та після впливу навколишнього середовища протягом 5 місяців.

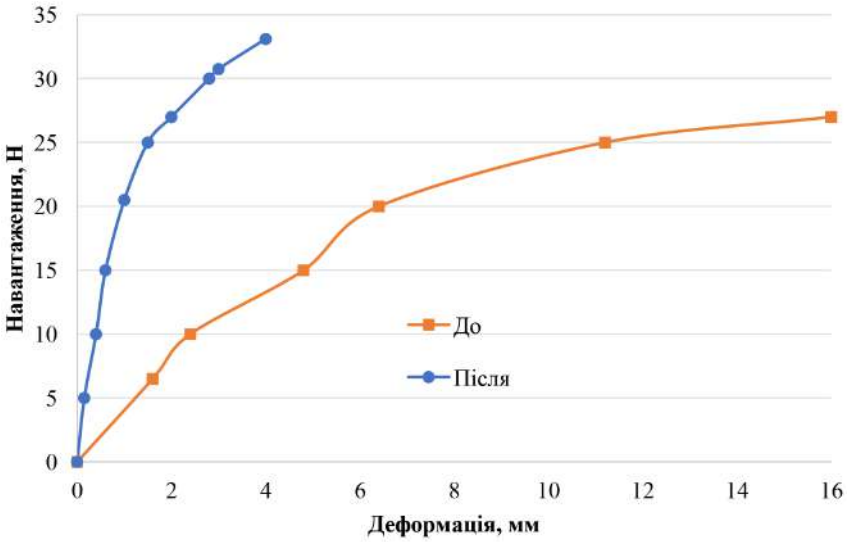


Рис. 3. Залежність навантаження від деформації зразка з композиції на основі ПВС/Кр виготовленого методом екструзії до та після впливу навколишнього середовища протягом 5 місяців

Як видно з рисунка 3 вихідний зразок матеріалу на основі ПВС/Кр виготовлений методом екструзії при навантаженні 33,1 Н та деформації 4 мм розірвався, а після перебування зразка в землі протягом 5 місяців спостерігається пом'якшення зразка, що характеризується зменшенням навантаження при розриві до 27 Н при деформації 16 мм.

На рис. 4. наведено залежність навантаження від деформації зразка з композиції на основі композиції ПВС/ТПК виготовленого методом лиття під тиском до та після впливу навколишнього середовища протягом 5 місяців.

Для вихідних зразків на основі ПВС/Кр виготовлених методом лиття під тиском характерне максимальне навантаження 48 Н після чого відбувається розрив зразка при деформації 48 мм. А для зразків після впливу навколишнього середовища протягом 5 місяців характерне максимальне навантаження 38,8 Н при деформації 84 %.

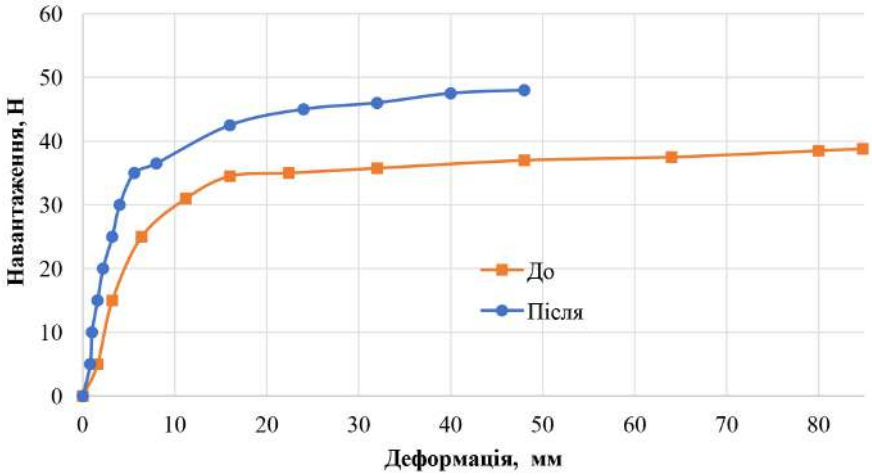


Рис. 4. Залежність навантаження від деформації зразка з композиції на основі ПВС/Кр виготовленого методом лиття під тиском до та після впливу навколишнього середовища протягом 5 місяців

Отже вихідні зразки на основі ПВС/Кр, які виготовлені методом екструзії мають меншу міцність у 1,45 разів та у 12 разів меншу еластичність у порівнянні з зразками, які виготовлені методом лиття під тиском. При дослідженні зразків після впливу навколишнього середовища протягом 5 місяців міцність зразків виготовлених методом екструзії та лиття під тиском зменшилася пропорційно вихідним зразкам і складає 1,44 рази. А деформація збільшилася у 5,3 рази при порівнянні цього показника для зразків виготовлених литтям під тиском і екструзії.

Зразки виготовлені методом лиття під тиском мають більшу межу міцності ніж зразки виготовлені методом екструзії. При чому для обох видів зразків межа міцності зменшується після впливу навколишнього середовища. Для литтєвих зразків межа міцності зменшилася з 2,65 до 2,5 МПа, а для екструдованих зразків – з 1,66 до 1,51 МПа. Отже зразки мають ознаки деструктивних процесів, що характеризує їх як деградабельні матеріали під дією навколишнього середовища.

Розрахунок відносного видовження показав, що зразки виготовлені методом лиття під тиском є більш еластичними, що дозволяє витримувати більші навантаження, а зразки отримані методом екструзії мають невисоку величину відносного видовження від 7,84 % для вихідних матеріалів і до 32,85 % для зразків після 5 місячного перебування у землі.

Отже, всі зразки зазнали зміни фізико-механічних властивостей, що свідчить про руйнування композиціях. Збільшення еластичності, ймовірно, пов'язано з тим, що під дією зовнішніх факторів руйнується крохмальна компонента, а синтетична ПВС складова залишається.

Висновки

В ході виконання досліджень встановлено, що рецептурний склад біорозкладних композицій на основі полівінілового спирту, кукурудзяного крохмалю та гліцерину для виготовлення одноразового посуду методом лиття під тиском.

Дослідження фізико механічних властивостей довели перевагу методу лиття під тиском над методом екструзії. Готові вироби отримані литтям під тиском показали кращу міцність, відносне видовження та стійкість до деформації.

Виготовлення одноразового екологічного посуду на основі ПВС/Кр в Україні можливе на базі вітчизняних підприємств з використанням існуючого обладнання, що є досить перспективним напрямком розвитку виробництва біодеградуючих матеріалів.

Список використаної літератури

1. N. Delangiz, S. Aliyar, N. Pashapoor, K. Nobaharan, B. Asgari Lajayer, S. Rodríguez-Couto. Can polymer-degrading microorganisms solve the bottleneck of plastics' environmental challenges? Chemosphere, 294 (2022), https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133709

2. Letcher T. M. Plastic Waste and Recycling: Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions / edited by T. M. Letcher. 1st Edition. Publisher : Academic Press, 2020. 686 p. https://doi.org/10.51202/0323-3243-2021-2-078-2

3. Zabihzadeh Khajavi M. et al. Strategies for controlling release of plastic compounds into foodstuffs based on application of nanoparticles and its potential health issues / M. Zabihzadeh Khajavi, R. Mohammadi, S. Ahmadi, M. Farhoodi, M. Yousefi. Trends in Food Science & Technology. 2019. Vol. 90. P. 1–12. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.05.009

4. Nagarajan K., Balaji A., Thanga Kasi Rajan S., Ramanujam N. Preparation of bio-eco based cellulose nanomaterials from used disposal paper cups through citric acid hydrolysis. Carbohydrate Polymers. 2020. Vol. 235. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.115997

5. Karan H. et al. Green Bioplastics as Part of a Circular Bioeconomy. Trends in Plant Science. 2019. Vol. 24. P. 237–249. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.010

6. Ramesh Kumar S., Shaiju P., O'Connor K.E., Babup R. Bio-based and biodegradable polymers. State-of-the-art, challenges and emerging trends. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. 2020. Vol. 21. P. 75–81. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2019.12.005

7. Jian Zhanga. Mechanical fatigue of biodegradable polymers: A study on polylactic acid (PLA), polybutylene succinate (PBS) and polybutylene adipate terephthalate (PBAT) / Jian Zhanga, Valerian Hirschbergb, Denis Rodriguea // International Journal of Fatigue Volume 159, June 2022, 106798. – 2021. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106798

8. Hao Cheng. Starch-based biodegradable packaging materials: A review of their preparation, characterization and diverse applications in the food industry / Hao Cheng, David Julian McClements // Trends in Food Science & Technology Volume 114, August 2021, Pages 70-82. – 2021. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.017

References

1. Delangiz, N., Aliyar, S., Pashapoor, N., Nobaharan, K., Asgari Lajayer, B., & Rodríguez-Couto, S. (2022). Can polymer-degrading microorganisms solve the bottleneck of plastics' environmental challenges? Chemosphere, 294, 133709. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133709

2. Plastic Waste and Recycling – Environmental Impact, Societal Issues, Prevention, and Solutions. (2021). *Technische Textilien*, 64(2), 78. https://doi.org/10.51202/0323-3243-2021-2-078-2

3. Zabihzadeh Khajavi, M., Mohammadi, R., Ahmadi, S., Farhoodi, M., & Yousefi, M. (2019). Strategies for controlling release of plastic compounds into foodstuffs based on application of nanoparticles and its potential health issues. *Trends in Food Science & Technology*, 90, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.05.009

4. Nagarajan, K. J., Balaji, A. N., Kasi Rajan, S. T., & Ramanujam, N. R. (2020). Preparation of bio-eco based cellulose nanomaterials from used disposal paper cups through citric acid hydrolysis. *Carbohydrate Polymers*, 235, 115997. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.115997

5. Karan, H., Funk, C., Grabert, M., Oey, M., & Hankamer, B. (2019). Green Bioplastics as Part of a Circular Bioeconomy. *Trends in Plant Science*, 24(3), 237–249. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.010

6. RameshKumar, S., Shaiju, P., O'Connor, K. E., & P, R. B. (2020). Bio-based and biodegradable polymers – State-of-the-art, challenges and emerging trends. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, *21*, 75–81. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2019.12.005

7. Zhang, J., Hirschberg, V., & Rodrigue, D. (2022). Mechanical fatigue of biodegradable polymers: A study on polylactic acid (PLA), polybutylene succinate (PBS) and polybutylene adipate terephthalate (PBAT). *International Journal of Fatigue*, *159*, 106798. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106798

8. Cheng, H., Chen, L., McClements, D. J., Yang, T., Zhang, Z., Ren, F., Miao, M., Tian, Y., & Jin, Z. (2021). Starch-based biodegradable packaging materials: A review of their preparation, characterization and diverse applications in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 70–82. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.017

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 20.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 678.017:661.12 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.14

О. В. ІЩЕНКО
доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри промислової фармації
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0002-9510-6005

І. В. ОХРІМЕНКО
аспірант кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження,
фахівець І категорії кафедри промислової фармації
Навчально-наукова лабораторія молекулярної фармакології, хемогеноміки
та біогеронтології
Київського національного університету технологій та дизайну
ORCID: 0009-0002-4338-8917

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МОЛЕКУЛЯРНОЇ МАСИ ГІАЛУРОНОВОЇ КИСЛОТИ НА СТРУКТУРНІ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛУ

Метою даної роботи було дослідження впливу молекулярної маси гіалуронової кислоти на структурні та функціональні властивості матеріалу у вигляді плівок. Як полімерну композицію було обрано суміш модифікований крохмаль, желатин та гіалуронова кислота з різною молекулярною масою. Дослідження проводилися шляхом одержання полімерних плівок на основі композицій карбоксиметильований крохмаль/желатин у співвідношеннях (50/50) з додаванням 1,0 % гіалуронової кислоти (низькомолекулярної, середньомолекулярної та високомолекулярної). В роботі експериментально встановленні реологічні залежності в'язкості від швидкості зсуву та досліджено кінетику водопоглинання. Плівки отримували з розчинів полімерної композиції методом поливу з сушкою при кімнатній температурі, з подальшим вивченням фізико-механічних властивостей та потенціалу для використання в трансдермальних системах.

Результати досліджень показали, що зразки з додаванням гіалуроновою кислотою, мали вищі на 5–10 % сорбційні властивості, вищу швидкість набухання та на 3–5 % нижчі фізико-механічні властивості порівняно зі зразками, одержаних на основі модифікованого крохмалю/желатину. Отримані плівки мали механічну міцність, не руйнувалися при нанесенні та використанні, повністю зберігали свою цілісність.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше було проведено порівняльне дослідження впливу молекулярної маси гіалуронової кислоти на властивості плівок на основі карбоксиметильований крохмаль/желатин для покращення функціональності плівок як зволожувальних засобів або носіїв для трансдермальних систем.

Це відкриває нові можливості для оптимізації виробничих процесів. Практична значимість дослідження полягає в розширенні асортименту носіїв активних фармацевтичних інгредієнтів для трансдермальних терапевтичних систем на сучасному ринку, пропонуючи новий продукт. Отримані результати створюють підґрунтя для подальшої оптимізації складу біополімерних плівок з метою розробки нових ефективних біосумісних матеріалів для медицини та фармацевтики.

Ключові слова: *метод поливу, гіалуронова кислота, модифікований крохмаль, желатин, трансдермальні терапевтичні системи.*

O. V. ISHCHENKO
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Industrial Pharmacy
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0002-9510-6005

I. V. OKHRIMENKO
Postgraduate Student at the Department of Chemical Technologies
and Resource Saving,
Specialist of the 1st Category at the Department of Industrial Pharmacy
Educational and Scientific Laboratory of Molecular Pharmacology, Chemogenomics
and Biogerontology of Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0009-0002-4338-8917

© Іщенко О. В., Охріменко І. В., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

RESEARCH ON THE EFFECT OF THE MOLECULAR WEIGHT OF HYALURONIC ACID ON THE STRUCTURAL AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF THE MATERIAL

This work aimed to study the effect of the molecular weight of hyaluronic acid on the structural and functional properties of the material in the form of films. The polymer composition was selected as a mixture of modified starch, gelatin, and hyaluronic acid with different molecular weights. The research was conducted by obtaining polymer films based on carboxymethylated starch/gelatin compositions in ratios (50/50) with the addition of 1.0 % hyaluronic acid (low molecular weight, medium molecular weight, and high molecular weight). The work experimentally established the rheological dependence of viscosity on shear rate and investigated the kinetics of water absorption. The films were obtained from solutions of the polymer composition by pouring and drying at room temperature, followed by a study of their physical and mechanical properties and potential for use in transdermal systems.

The results of the studies showed that samples with the addition of hyaluronic acid had 5–10 % higher sorption properties, swelling rate, and 3–5 % lower physical and mechanical properties than samples obtained based on modified starch/gelatin. The films obtained had mechanical strength, did not break during application and use, and completely retained their integrity.

The scientific novelty of the work lies in the fact that, for the first time, a comparative study was conducted on the effect of the molecular weight of hyaluronic acid on the properties of films based on carboxymethylated starch/gelatin to improve the functionality of films as moisturisers or carriers for transdermal systems.

This opens up new opportunities for optimising production processes. The study's practical significance lies in expanding the range of carriers of active pharmaceutical ingredients for transdermal therapeutic systems on the modern market by offering a new product. The results obtained create a basis for further optimizing the composition of biopolymer films to develop new, effective biocompatible materials for medicine and pharmaceuticals.

Key words: *watering method, hyaluronic acid, modified starch, gelatin, transdermal therapeutic systems.*

Постановка проблеми

Біополімери, завдяки своїм властивостям, таким як біосумісність, біорозкладність та нетоксичність, є перспективною основою для розробки функціональних матеріалів нового покоління. Їхня природа робить їх ідеальними кандидатами для застосувань у біомедицині, фармацевтиці та космецевтиці, де взаємодія з біологічними системами має критичне значення. Особливу увагу в цьому контексті привертають «інтелектуальні гелі» – матеріали, здатні реагувати на зовнішні подразники, такі як температура, рівень pH, іонна сила або присутність специфічних молекул. Ця здатність до контрольованої зміни форми, розміру або інших властивостей відкриває широкі можливості для їх використання у високотехнологічних галузях, включаючи керовану доставку ліків, регенеративну медицину та тканинну інженерію [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні наукові дослідження приділяють значну увагу розробці природних полімерних матеріалів, які відповідають критеріям та доступності з відновлюваних ресурсів. Ці матеріали, відомі як біоматеріали, призначені для взаємодії з біологічними рідинами, живими тканинами та допоміжними клітинами [2]. Вони знаходять широке застосування в різних галузях медицини, включаючи хірургію, ортопедію та стоматологію, де використовуються для лікування, відновлення пошкоджених тканин, заміщення втрачених функцій або в діагностичних цілях. Прикладами таких застосувань є системи доставки ліків, імплантати, медичні пристрої та протези [3].

Термін «біополімер» охоплює всі полімери, що синтезуються живими організмами, такими як мікроорганізми, водорості, рослини та тварини. Вони складаються з численних ковалентно зв'язаних мономерних одиниць, що утворюють клітинні та тканинні структури, здатні до росту, розмноження та регенерації. Біополімери виконують різноманітні біологічні функції: від формування сполучної тканини та підтримки функціонування органів, як, наприклад, людського хряща, до участі в сигнальних шляхах, що ініціюють ендокринні процеси [4].

Завдяки природному походженню, біополімери мають відмінні біохімічні, механічні та термічні властивості, що робить їх надзвичайно придатними для численних фармацевтичних та біомедичних застосувань. Їхня безпечність та екологічність вигідно відрізняють їх від синтетичних аналогів, що сприяє активному дослідженню та впровадженню біополімерів у сучасну медицину [5].

Гіалуронова кислота – це природний аніонний полісахарид, що відіграє ключову роль у біологічних системах. Її нерозгалужена лінійна структура складається з повторюваних дисахаридних одиниць N-ацетил-β-D-глюкозаміну та β-D-глюкуронової кислоти (рис. 1), з'єднаних поперемінно глікозидними зв'язками (1→3) та (1→4). Молекулярна маса гіалуронової кислоти варіюється в широких межах, від 10^3 кДа до 10^4 кДа, що обумовлює її унікальні фізико-хімічні властивості.

Гіалуронова кислота є повсюдною в організмі хребетних, зокрема, у позаклітинному матриксі хряща, синовіальній рідині, шкірі, пуповині та склоподібному тілі [7].

Однією з головних переваг гіалуронової кислоти є її низька імуногенність та відмінна біосумісність, що робить її ідеальним кандидатом для біомедичних застосувань. Однак для підвищення механічної міцності та створення стабільних функціональних біоматеріалів на основі гілауронової кислоти часто піддають хімічній модифікації.

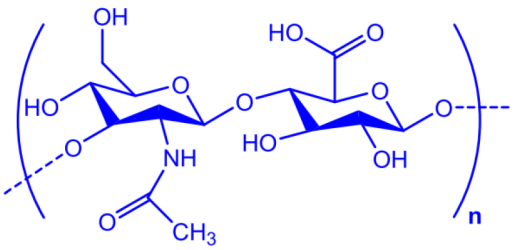


Рис. 1. Хімічна структура гіалуронової кислоти [6]

Це включає введення додаткових функціональних груп або зшивання полімерних ланцюгів, що значно покращує її механічні характеристики [8].

Структурні, фізичні, фізико-хімічні та деградаційні властивості гіалуронової кислоти безпосередньо залежать від її молекулярної маси. Зокрема, зростання як молекулярної маси, так і концентрації гіалуронової кислоти у полімерних розчинах сприяє формуванню більш вираженої тривимірної полімерної сітки, що призводить до значного збільшення в'язкості та в'язкопружності розчину [9].

У сучасних умовах військових конфліктів особлива увага приділяється розробці ефективних технологій лікування ран, отриманих під час бойових дій. Гіалуронова кислота є перспективним матеріалом для терапії таких ушкоджень завдяки своїй здатності стимулювати регенерацію тканин та покращувати процес загоєння. Вона також показала високу ефективність у лікуванні післяопераційних ран, ран після резекції чи ампутації, а також при недостатності швів.

Сучасні препарати на основі гіалуронової кислоти доступні у різних формах – гранули, креми, мембрани, спреї, пов'язки для ран та в'язкі розчини – що дозволяє адаптувати їх застосування до різних клінічних сценаріїв. Висококонцентровані форми гіалуронової кислоти демонструють не лише підвищену ефективність загоєння, а й економічну вигідність, що робить їх привабливими для широкого використання, включно з лікуванням ран великої площі [10].

Зважаючи на важливість оптимізації властивостей матеріалу для медичних застосувань, вивчення впливу молекулярної маси гіалуронової кислоти на її структурні та функціональні характеристики є актуальним напрямом досліджень. Розуміння цього взаємозв'язку дозволяє підвищити ефективність матеріалів для загоєння ран, покращити їх механічні та реологічні властивості, а також оптимізувати форми випуску для клінічної практики.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження встановлення впливу молекулярної маси гіалуронової кислоти на структурні та функціональні властивості матеріалу у вигляді плівок.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для покращення функціональних властивостей плівок, як носіїв активних фармацевтичних інгредієнтів для трансдермальних систем було проведено дослідження впливу молекулярної маси гіалуронової кислоти на властивості плівок на основі карбоксиметильованого крохмаль (КМК) та желатину.

Для роботи було використано карбоксиметильований крохмаль (Aschem GmbH, Швейцарія, вміст діючої речовини не менше 75,0 %) CAS 9057-06-1 (CMS), гліцерин (BASF, Німеччина), желатин (Trobas Gelatine BV, Нідерланди, вміст діючої речовини не менше 99,8 %), CAS 9000-70-8, гіалуронова кислота (Hyaluronic acid), CAS: 9004-61-9 (Німеччіна), високомолекулярна (ГКВММ) (молекулярна маса $1,3 \times 10^6 – 1,5 \times 10^6$), середньомолекулярна (ГКСрММ) (Мм = $2,0 \times 10^5 – 1,0 \times 10^6$), низькомолекулярна (ГКНММ) (Мм = $1,2 \times 10^5$).

Розчин карбоксиметильованого крохмалю (КМК) готували шляхом диспергування 10,0 г сухого КМК у 90,0 г дистильованої води за температури 20–22 °С. Суміш перемішували протягом 15 хвилин до утворення однорідної, прозорої та в'язкої маси.

Для набухання желатину 10,0 г желатину заливали 90,0 г дистильованої води, доводячи загальний об'єм до 100 мл. Суспензію желатину перемішували залишали для набухання на одну годину. Перед подальшим використанням желатин розчиняли шляхом нагрівання суміші до 40 °С при періодичному перемішуванні до повного розчинення.

Приготовані розчини КМК та желатину змішували у співвідношенні 50/50. До цієї суміші додавали 1 % гіалуронової кислоти (ГК) різної молекулярної маси (низькомолекулярної, середньомолекулярної та високомолекулярної) від маси сухої речовини полімерного складу. Усі утворені композиції додатково містили 2 % (від маси сухого полімеру) гліцерину, який використовувався як пластифікатор.

Плівки отримували методом поливу розчину полімерної композиції на скляну поверхню з подальшою сушкою при 20 °С.

Для визначення в'язкості полімерних розчинів застосовували програмований реометр Brookfield Model DV-III+ (Brookfield Engineering Laboratories, Inc., США), оснащений вбудованим термостатом Brookfield TC 200. Вимірювання проводили за температури 20 °С у діапазоні швидкостей зсуву від 10 до 230 $с^{-1}$.

В'язкість розчинів на основі композиції КМК/желатин з гіалуроновою кислотою підпорядковується степеневому закону та описується рівнянням Оствальда-де-Ваеле:

$$\eta = K \cdot \gamma^{n-1},$$

де η – видима в'язкість (Па · с), K – індекс консистенції (Па · с), γ – швидкість зсуву ($с^{-1}$), а *n* – індекс текучості. Параметри K та n є ключовими характеристиками реологічної поведінки рідин, що підкоряються степеневому закону. Індекс текучості *n* є безрозмірною величиною: для псевдопластичних рідин $n < 1$, тоді як для дилатантних рідин $n > 1$.

В роботі досліджено сорбційні властивості матеріалів одержаних на основі композицій КМК/Желатин з гіалуроновою кислотою шляхом занурення зразків у дистильовану воду. Розрахунок сорбції (W) здійснювався гравіметричним методом за формулою:

$$W = \frac{(m_i - m_0)}{m_0} \cdot 100\ \%$$

де m_i – маса зразка у момент часу *i*, m_0 – початкова маса зразка.

Міцність на розрив та відносне подовження при розриві визначали відповідно до стандарту ASTM D882-18 [11]. Для проведення випробувань використовували розривну машину BDO–FBO.5TH (ZwickRoell, Німеччина).

Результати досліджень

Оброблені результати реологічних досліджень розчинів полімерних композицій представлені на рис. 2.

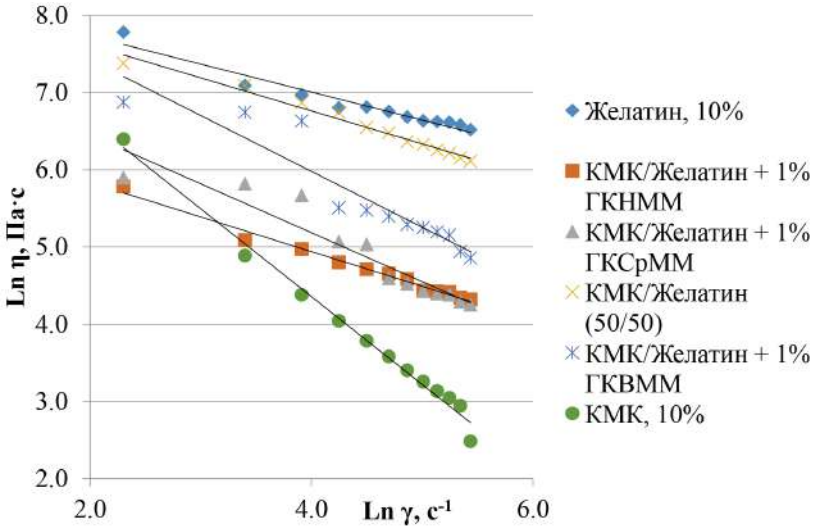


Рис. 2. Залежність в'язкості розчину на основі карбоксиметильованого крохмалю/ желатину з гіалуроновою кислотою від швидкості зсуву

Після математичної обробки експериментальних даних встановлено коефіцієнти: *K* – індекс консистенції та *n* – індекс текучості (табл.1).

Таблиця 1

Значення констант *K* та n рівняння (1) для розчинів карбоксиметильованого крохмалю, желатину та для композицій з додаванням гіалуронової кислоти

Значення	Желатин, 10 %	КМК/Желатин + 1 % ГКНММ	КМК/Желатин + 1 % ГКСрММ	КМК/Желатин + 1 % ГКВММ	КМК/Желатин (50/50)	КМК, 10 %
K, Па · с	8,456	6,7316	7,7134	8,8725	8,4705	8,8986
n	0,64	0,56	0,37	0,38	0,58	0,13

Дослідження реологічних характеристик полімерних композицій на основі карбоксиметильованого крохмалю, желатину та гіалуронової кислоти показало, що всі зразки демонструють псевдопластичну поведінку ($n < 1$), зменшенням в'язкості зі зростанням градієнта зсуву. Чистий желатин характеризується найбільш високою стабільністю структурно-механічних властивостей, тоді як карбоксиметильований крохмаль проявляє найменшу здатність до утворення стабільних гідрогелевих структур.

Додавання гіалуронової кислоти до суміші КМК/желатин суттєво модифікує реологічні властивості системи. Встановлено, що низькомолекулярна гіалуронова кислота знижує в'язкість, діючи як пластифікатор і зменшуючи

міжмолекулярні взаємодії. На відміну від цього, середньо- та особливо високомолекулярна гіалуронова кислота сприяють формуванню більш вираженої тривимірної полімерної сітки, що забезпечує підвищення в'язкопружності композицій.

Таким чином, молекулярна маса гіалуронової кислоти є ключовим фактором, який визначає структурні та функціональні властивості полімерних систем на основі КМК та желатину. Отримані результати можуть бути використані для цілеспрямованого створення біоматеріалів із заданими реологічними характеристиками, зокрема для застосувань у біомедичній галузі (створення покриттів, мембран та засобів для лікування ран).

На рис. 3 наведено залежність водопоглинання води для зразків на основі КМК/желатин з додаванням гіалуронової кислоти.

Дослідження кінетики водопоглинання полімерних плівок на основі карбоксиметильованого крохмалю та желатину показало, що додавання гіалуронової кислоти сприяє підвищенню їх сорбційних властивостей. У зразках з 1 % гіалуронової кислоти спостерігалося збільшення маси набухлих плівок у порівнянні з базовою

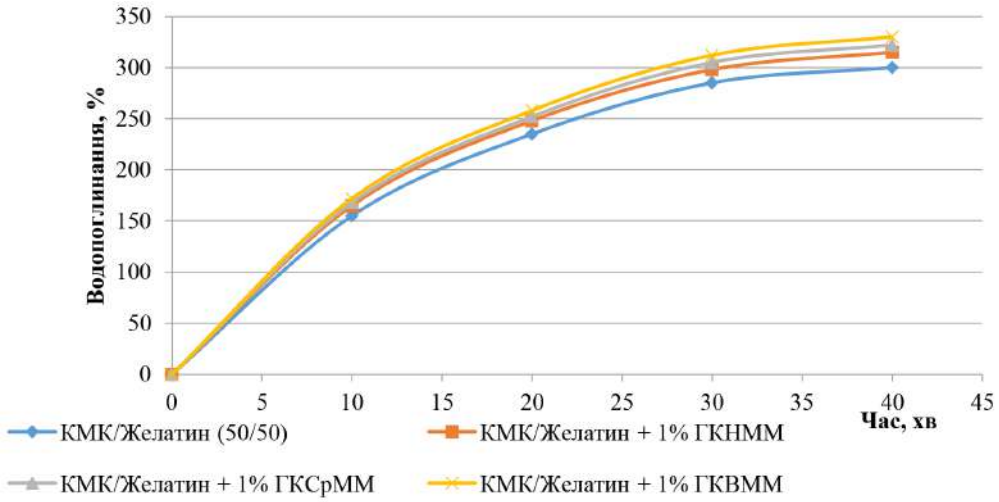


Рис. 3. Кінетика водопоглинання плівок на основі карбоксиметильованого крохмалю та желатину з додаванням гіалуронової кислоти

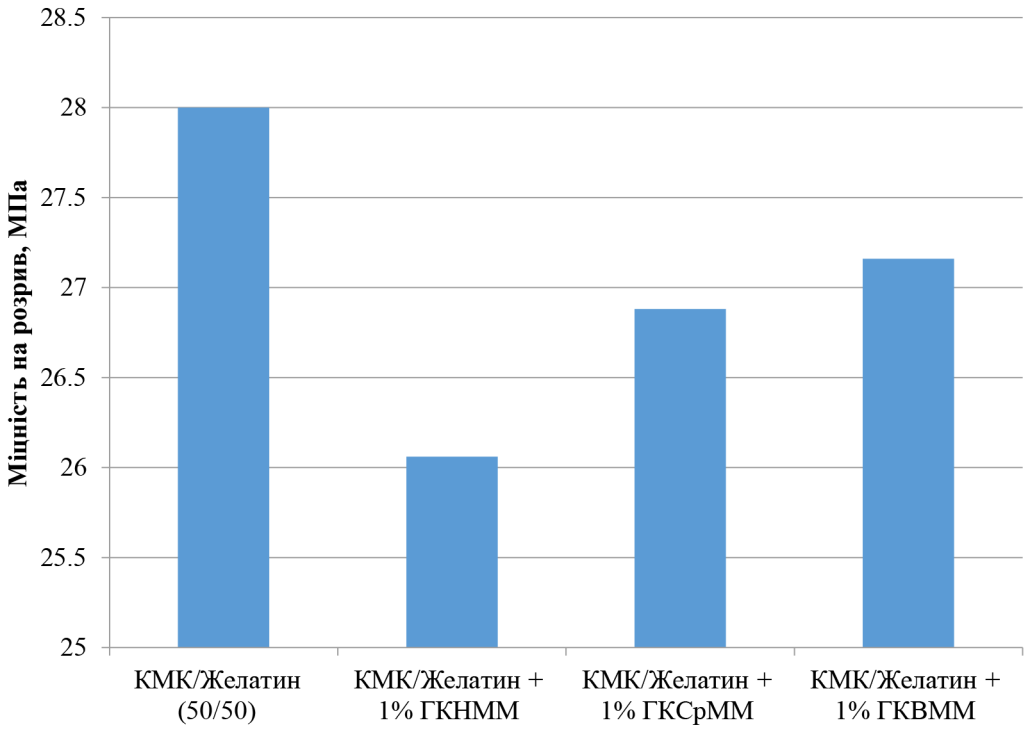


Рис. 4. Показники міцності плівок на основі карбоксиметильваного крохмалю/желатину з додаванням 1 % гіалуронової кислоти

композицією КМК/Желатин (50/50). Зразки з низькомолекулярною ГК мали приблизно на 5 % вищу швидкість набухання, із середньомолекулярною – на 7 %, а з високомолекулярною – на 10 %. Це свідчить, що молекулярна маса гіалуронової кислоти є визначальним фактором, який впливає на водопоглинання та формування більш розвиненої тривимірної сітки полімерної матриці. Таким чином, модифікація композицій КМК/Желатин гіалуроновою кислотою дозволяє регулювати їх сорбційні властивості та підвищує потенціал використання таких матеріалів у біомедичних і фармацевтичних застосуваннях.

На рис. 4 наведено показники міцності плівок на основі КМК/желатину та з додаванням 1 % гіалуронової кислоти.

Додавання гіалуронової кислоти, незалежно від її молекулярної маси, призводить до певного зниження міцності на розрив плівок КМК/желатин порівняно з контролем. Однак, збільшення молекулярної маси гіалуронової кислоти супроводжується покращенням міцності на розрив, при цьому зразки з високомолекулярною гіалуроновою кислотою демонструють найближчі до контролю показники. Це вказує на те, що для досягнення оптимальних фізико-механічних властивостей плівок з гіалуроновою кислотою слід віддавати перевагу високомолекулярним її формам.

Висновки

В роботі досліджено вплив молекулярної маси гіалуронової кислоти на структурні та функціональні властивості полімерних плівок, отриманих на основі композиції карбоксиметильованого крохмалю та желатину у співвідношенні 50/50.

Встановлено, що додавання 1,0 % гіалуронової кислоти до складу композиції КМК/желатин змінює властивості отриманих плівок, підвищує на 5–10 % сорбційні властивості та швидкість набухання, що робить їх більш ефективними як зволожувальні засоби, знижує фізико-механічні властивості на 3–5 %. Незважаючи на це, отримані плівки зберігали достатню механічну міцність та цілісність, що підтверджує їхню придатність для використання.

Отримані результати потребують подальших досліджень, для рекомендації цих плівок, як носіїв активних фармацевтичних інгредієнтів для трансдермальних систем. Запропонована композиція може слугувати основою для нового продукту, що поєднує зволожувальні та біоадгезійні властивості з можливістю контрольованого вивільнення лікарських речовин.

Список використаної літератури

1. Ilić-Stojanović, S., Nikolić, L., & Cakić, S. (2023). A Review of Patents and Innovative Biopolymer-Based Hydrogels. *Gels (Basel, Switzerland)*, 9(7), 556. https://doi.org/10.3390/gels9070556

2. Zhao, Y., Wang, X., Qi, R., & Yuan, H. (2023). Recent Advances of Natural-Polymer-Based Hydrogels for Wound Antibacterial Therapeutics. *Polymers*, *15*(15), 3305. https://doi.org/10.3390/polym15153305

3. Hama, R., Ulziibayar, A., Reinhardt, J. W., Watanabe, T., Kelly, J., & Shinoka, T. (2023). Recent Developments in Biopolymer-Based Hydrogels for Tissue Engineering Applications. *Biomolecules*, *13*(2), 280. https://doi.org/10.3390/biom13020280

4. Varma, K., & Gopi, S. (2021). Biopolymers and their role in medicinal and pharmaceutical applications. *Biopolymers and their Industrial Applications* (с. 175–191). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819240-5.00007-9

5. Oleksy, M., Dynarowicz, K., & Aebisher, D. (2023). Advances in Biodegradable Polymers and Biomaterials for Medical Applications – A Review. *Molecules*, *28*(17), 6213. https://doi.org/10.3390/molecules28176213

6. Chen, L. H., Xue, J. F., Zheng, Z. Y., Shuhaidi, M., Thu, H. E., & Hussain, Z. (2018). Hyaluronic acid, an efficient biomacromolecule for treatment of inflammatory skin and joint diseases: A review of recent developments and critical appraisal of preclinical and clinical investigations. *International Journal of Biological Macromolecules*, 116, 572–584. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.05.068

7. Salwowska, N. M., Bebenek, K. A., Żądło, D. A., & Wcisło-Dziadecka, D. L. (2016). Physiochemical properties and application of hyaluronic acid: a systematic review. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 15(4), 520–526. https://doi.org/10.1111/jocd.12237

8. Di Mola, A., Landi, M. R., Massa, A., D'Amora, U., & Guarino, V. (2022). Hyaluronic Acid in Biomedical Fields: New Trends from Chemistry to Biomaterial Applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(22), 14372. https://doi.org/10.3390/ijms232214372

9. Fallacara, A., Baldini, E., Manfredini, S., & Vertuani, S. (2018). Hyaluronic Acid in the Third Millennium. *Polymers*, *10*(7), 701. https://doi.org/10.3390/polym10070701

10. Jouyandeh, M., Ganjali, M. R., Aghazadeh, M., Habibzadeh, S., Formela, K., & Saeb, M. R. (2020). Bulk-Surface Modification of Nanoparticles for Developing Highly-Crosslinked Polymer Nanocomposites. *Polymers*, *12*(8), 1820. https://doi.org/10.3390/polym12081820

11. ASTM D882 Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting 2018.

References

1. Ilić-Stojanović, S., Nikolić, L., & Cakić, S. (2023). A Review of Patents and Innovative Biopolymer-Based Hydrogels. *Gels (Basel, Switzerland)*, 9(7), 556. https://doi.org/10.3390/gels9070556

2. Zhao, Y., Wang, X., Qi, R., & Yuan, H. (2023). Recent Advances of Natural-Polymer-Based Hydrogels for Wound Antibacterial Therapeutics. *Polymers*, *15*(15), 3305. https://doi.org/10.3390/polym15153305

3. Hama, R., Ulziibayar, A., Reinhardt, J. W., Watanabe, T., Kelly, J., & Shinoka, T. (2023). Recent Developments in Biopolymer-Based Hydrogels for Tissue Engineering Applications. *Biomolecules*, *13*(2), 280. https://doi.org/10.3390/biom13020280

4. Varma, K., & Gopi, S. (2021). Biopolymers and their role in medicinal and pharmaceutical applications. *Biopolymers and their Industrial Applications* (c. 175–191). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819240-5.00007-9

5. Oleksy, M., Dynarowicz, K., & Aebisher, D. (2023). Advances in Biodegradable Polymers and Biomaterials for Medical Applications – A Review. *Molecules*, *28*(17), 6213. https://doi.org/10.3390/molecules28176213

6. Chen, L. H., Xue, J. F., Zheng, Z. Y., Shuhaidi, M., Thu, H. E., & Hussain, Z. (2018). Hyaluronic acid, an efficient biomacromolecule for treatment of inflammatory skin and joint diseases: A review of recent developments and critical appraisal of preclinical and clinical investigations. *International Journal of Biological Macromolecules*, 116, 572–584. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.05.068

7. Salwowska, N. M., Bebenek, K. A., Żądło, D. A., & Wcisło-Dziadecka, D. L. (2016). Physiochemical properties and application of hyaluronic acid: a systematic review. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 15(4), 520–526. https://doi.org/10.1111/jocd.12237

8. Di Mola, A., Landi, M. R., Massa, A., D'Amora, U., & Guarino, V. (2022). Hyaluronic Acid in Biomedical Fields: New Trends from Chemistry to Biomaterial Applications. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(22), 14372. https://doi.org/10.3390/ijms232214372

9. Fallacara, A., Baldini, E., Manfredini, S., & Vertuani, S. (2018). Hyaluronic Acid in the Third Millennium. *Polymers*, *10*(7), 701. https://doi.org/10.3390/polym10070701

10. Jouyandeh, M., Ganjali, M. R., Aghazadeh, M., Habibzadeh, S., Formela, K., & Saeb, M. R. (2020). Bulk-Surface Modification of Nanoparticles for Developing Highly-Crosslinked Polymer Nanocomposites. *Polymers*, *12*(8), 1820. https://doi.org/10.3390/polym12081820

11. ASTM D882 Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting 2018.

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 23.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 621.7 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.15

О. В. КАНІВЕЦЬ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-4364-8424

С. В. ПОПОВ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-2381-152X

ПЕРСПЕКТИВИ УДОСКОНАЛЕННЯ РОБОТИ МЕХАНОСКЛАДАЛЬНИХ ДІЛЬНИЦЬ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇХ РІЗАЛЬНИМ ІНСТРУМЕНТОМ У ВОЄННИЙ ЧАС

У статті проаналізовано функціонування підприємств машинобудівного комплексу України в екстремальних умовах воєнного стану. Систематизовано ключові виклики, що постають перед механоскладальними дільницями: критичне порушення логістичних ланцюгів у тому числі із забезпечення їх різальним інструментом, дефіцит кваліфікованих кадрів, енергетична нестабільність та постійна загроза руйнування виробничих активів. Обґрунтовано, що традиційні моделі організації виробництва виявились неефективними та вразливими у воєнний час. Тим самим виявлено нагальну науково-практичну проблему розробки адаптивних механізмів управління виробництвом. Метою даного дослідження є надання рекомендацій щодо перспектив удосконалення організаційно-технічної структури та операційної діяльності механоскладальних дільниць, спрямованих на підвищення їх гнучкості, стійкості, ефективності та забезпечення їх різальним інструментом в умовах воєнного стану. Обґрунтовано доцільність переходу від лінійної організації виробничого потоку до створення автономних гнучких виробничих комірок, які здатні до швидкого переналагодження та паралельного виконання завдань. Розроблено рекомендації щодо технологічної модернізації, зокрема інтеграції адитивних технологій для оперативного виготовлення оснащення та компонентів, а також впровадження цифрових інструкцій з елементами доповненої реальності для прискорення процесу складання виробів та навчання персоналу. Запропоновано заходи з реінжинірингу логістики через диверсифікацію постачальників та впровадження локальних систем управління запасами Kanban. Сформульовано підходи до управління персоналом, що включають крос-функціональну підготовку та психологічну підтримку. Реалізація запропонованого комплексу заходів дозволяє трансформувати механоскладальну дільницю у стійку та адаптивну виробничу систему, що забезпечить зниження залежності від зовнішніх дестабілізуючих факторів, скорочення виробничого циклу, мінімізацію втрат обмежених ресурсів та підтримку стабільно високої якості продукції.

Ключові слова: *механоскладальна дільниця, воєнний стан, оптимізація виробництва, гнучкі виробничі системи, ощадливе виробництво.*

O. V. KANIVETS
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Mechanical and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0003-4364-8424

S. V. POPOV
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Mechanical and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0003-2381-152X

PROSPECTS FOR IMPROVING THE WORK OF MECHANICAL ASSEMBLY SECTIONS AND PROVIDING THEM WITH CUTTING TOOLS IN MARTIAL LAW

The article analyzes the functioning of enterprises in Ukraine's machine-building complex under the extreme conditions of martial law. It systematizes the key challenges facing mechanical assembly shops: critical disruption of logistics chains, including the supply of cutting tools, a shortage of skilled personnel, energy instability, and the

© Канівець О. В., Попов С. В., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

constant threat of destruction of production assets. It has been substantiated that traditional models of production organization have proven to be ineffective and vulnerable in wartime. This has revealed an urgent scientific and practical problem of developing adaptive production management mechanisms. The purpose of this study is to provide recommendations on the prospects for improving the organizational and technical structure and operational activities of mechanical assembly shops, aimed at increasing their flexibility, stability, efficiency, and ensuring their supply with cutting tools in conditions of martial law. The feasibility of transitioning from a linear organization of the production flow to the creation of autonomous flexible production cells capable of rapid reconfiguration and parallel task execution is justified. Recommendations have been developed for technological modernization, in particular the integration of additive technologies for the rapid manufacture of equipment and components, as well as the introduction of digital instructions with augmented reality elements to speed up the process of assembling products and training personnel. Measures for logistics reengineering through supplier diversification and the introduction of local Kanban inventory management systems are proposed. Approaches to personnel management are formulated, including cross-functional training and psychological support. The implementation of the proposed set of measures will transform the mechanical assembly shop into a stable and adaptive production system, which will reduce dependence on external destabilizing factors, shorten the production cycle, minimize the loss of limited resources, and maintain consistently high product quality.

Key words: *mechanical assembly shop, martial law, production optimization, flexible manufacturing systems, lean manufacturing.*

Постановка проблеми

Функціонування промислових підприємств України в умовах повномасштабної війни характеризується екстремальним рівнем невизначеності та ризиків. Особливо гостро ці виклики постають перед машинобудівною галуззю, яка є фундаментом обороноздатності та економічної стійкості держави [1]. Механоскладальні дільниці, як ключові ланки у створенні кінцевої продукції, зазнають безпрецедентного тиску, що зумовлений порушенням ланцюгів постачання комплектуючих, мобілізацією значної частини кваліфікованого персоналу, енергетичними обмеженнями та постійною загрозою ракетних обстрілів. Традиційні моделі організації виробництва орієнтовані на стабільні умови та довгострокове планування, а у період невизначеності можуть бути неефективними [2]. Виникає нагальна науково-практична потреба у розробці та адаптації нових підходів до організації роботи механоскладальних дільниць, які б дозволили не лише зберегти виробничий потенціал, але й забезпечити його ефективне функціонування та розвиток у кризових умовах. Необхідність швидкого переналагодження на випуск нової або модифікованої продукції військового та подвійного призначення, мінімізація втрат та забезпечення високої якості за обмежених ресурсів вимагають системного перегляду існуючих виробничих процесів та впровадження інноваційних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика підвищення ефективності механоскладальних дільниць та цехів є предметом постійної уваги науковців. Класичні підходи, що викладені у працях з організації виробництва, фокусуються на методах поточної та потоково-конвеєрної зборки, оптимізації тактів та мінімізації міжопераційних простоїв [3]. Водночас сучасні дослідження концентруються навколо концепцій ощадливого виробництва [4], гнучких виробничих систем [5] та цифрової трансформації Індустрія 4.0 [6].

Так, у роботах [7, 8], значна увага приділяється питанням оптимізації виробничих потоків за рахунок впровадження інструментів Lean Manufacturing, таких як 5S, Kanban, SMED. Проте, більшість подібних досліджень проведено в умовах мирного часу і вони не враховують специфіку ризиків, що пов'язані із військовими діями.

Наукові праці [9, 10] присвячені стійкості ланцюгів постачання, у яких дослідники проаналізували стратегії диверсифікації постачальників, створення резервних запасів та релокації виробничих потужностей як відповідь на кризові явища. Ряд досліджень [11, 12] зосередженні на вивченні ролі цифрових двійників Digital Twins у моделюванні та оптимізації виробничих процесів в умовах динамічних змін, що є вкрай актуальним для швидкого переналагодження виробництва. У роботах [13, 14], що присвячені адитивним технологіям, автори підкреслюють їх потенціал для оперативного виготовлення деталей, що є критично важливим при порушенні традиційних каналів постачання.

Однак, незважаючи на значну кількість досліджень з оптимізації виробництва та управління ризиками, бракує комплексних наукових праць, які б системно адаптували ці концепції до унікальних та екстремальних умов функціонування саме механоскладальних дільниць українських підприємств у період воєнного стану. Існуючі публікації або розглядають загальні аспекти стійкості бізнесу або фокусуються на окремих технологічних рішеннях, не пропонуючи цілісної моделі реорганізації виробничого процесу.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є надання рекомендацій щодо перспектив удосконалення організаційно-технічної структури та операційної діяльності механоскладальних дільниць, спрямованих на підвищення їх гнучкості, стійкості, ефективності та забезпечення їх різальним інструментом в умовах воєнного стану.

Викладення основного матеріалу дослідження

Удосконалення роботи механоскладальних дільниць у воєнний час потребує комплексного підходу, що охоплює організаційні, технологічні та кадрові аспекти. Пропонована модель базується на трьох фундаментальних принципах: гнучкість, стійкість та цифровізація.

1. Організаційна гнучкість: перехід до модульних комірок.

Класична лінійна або предметно-замкнена структура дільниці є вразливою до збоїв. Вихід з ладу обладнання або персоналу однієї ланки може зупинити весь процес. В умовах війни, коли ризики раптових зупинок є надзвичайно високими через повітряні тривоги, перебої з енергопостачанням, відсутності компонентів, доцільним є перехід до моделі гнучких виробничих комірок (ГВК).

ГВК – це автономна група універсального обладнання та багатопрофільних робітників для виконання повного циклу виробництва і складання окремого вузла або невеликого виробу [15]. Вона як мініатюрна дільниця всередині великого цеху, що організована за принципом «острівної» автономії. В основі її структури лежить група різнотипного, але логічно пов'язаного і компактно розташованого обладнання зазвичай у формі літери «U». Така конфігурація дозволяє одному або кільком робітникам-універсалам виконувати послідовно всі операції зі створення вузла чи деталі мінімізуючи переміщення.

Ключовим елементом гнучких виробничих комірок є «багатопрофільна команда». На відміну від конвеєра, де кожен працівник виконує одну монотонну операцію, у ГВК робітники володіють декількома суміжними навиками та можуть взаємно замінювати один одного. Вони несуть повну відповідальність за весь цикл роботи в межах своєї комірки від подачі заготовок до контролю якості готового продукту. Логістика матеріальних потоків також локалізована. Комірка має власний невеликий запас необхідних компонентів та робить її менш залежною від загальноцехової логістики.

Запропонована структура дозволяє створити паралельні процеси для одночасного складання різних вузлів. Такий підхід знижує залежність від послідовних операцій, а також підвищує стійкість виробництва у разі зупинки однієї комірки, наприклад, через відсутність специфічного компонента, у той час як інші – продовжують працювати. Компактні команди та універсальне обладнання дозволяють оперативно змінювати об'єкт складання та швидко переналагоджувати виробництво. У таблиці 1 наведено порівняльний аналіз організаційних структур дільниці.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз організаційних структур дільниці

Характеристика	Лінійна структура (конвеєр)	Гнучка виробнича комірка
Принцип роботи	Послідовний, жорсткий такт	Паралельний, автономний
Тип обладнання	Спеціалізоване	Універсальне, переналагоджуване
Вимоги до персоналу	Вузька спеціалізація	Багатопрофільність, взаємозамінність
Гнучкість	Низька	Висока
Стійкість до збоїв	Низька (ефект доміно)	Висока (локалізація проблеми)
Ефективність	Максимальна при масовому виробництві	Висока при дрібносерійному та мінливому виробництві

2. Технологічна модернізація та адаптація.

Технологічне забезпечення дільниці повинно бути спрямоване на автономність та швидкість. Впровадження адитивних технологій, таких як промислові 3D-принтери, дозволяє оперативно виготовляти елементи технологічного оснащення, наприклад, ложементи, фіксатори, шаблони, а також дрібні допоміжні деталі та навіть деякі компоненти кінцевого виробу. Таке рішення радикально знижує залежність від зовнішніх постачальників оснащення та комплектуючих, терміни постачання яких в надзвичайних умовах є непередбачуваними.

В умовах воєнного часу паперові носії інформації можуть бути втрачені або пошкоджені. Як доповнення до паперових креслеників та технологічних карт доцільно використовувати планшетні комп'ютери із захищеним доступом до цифрових моделей та інтерактивних інструкцій у хмарних сервісах. У свою чергу, технології доповненої реальності (AR) можуть проектувати віртуальні підказки безпосередньо на робочу зону складальника, що прискорює процес складання вузлів, мінімізує помилки та значно скорочує час на навчання нового персоналу, що є критичним при високій плинності кадрів.

3. Реінжиніринг логістики та управління запасами.

Порушення ланцюгів постачання сировини та оснащення є однією з ключових проблем. Стратегія оптимізації має включати диверсифікацію постачальників, локалізацію виробництва компонентів та впровадження системи «двох контейнерів».

Замість одного основного постачальника, часто з географічно вразливого регіону, необхідно мати 2–3 альтернативних варіанти, що розташовані у різних регіонах України. Критичні компоненти бажано доставляти із-за кордону. Додатково необхідно провести аудит комплектуючих з метою налагодження їх виробництва на суміжних дільницях власного підприємства або у місцевих партнерів.

Запровадження системи Kanban дозволить уникнути простоїв виробництва через відсутність сировини. Система має можливість здійснювати візуальний контроль рівня запасів дрібних стандартних компонентів. Робочий запас знаходиться в першому контейнері. У разі закінчення деталей, робітник бере другий резервний контейнер і подає сигнал на поповнення першого. Таким чином створюється буфер безпеки, що дорівнює часу поставки.

4. Управління персоналом в екстремальних умовах.

В екстремальних умовах людський фактор набуває вирішального значення. Дефіцит кадрів через мобілізацію та міграцію вимагає нетривіальних рішень. Розробка інтенсивних програм навчання дозволяють працівникам опановувати суміжні професії. Так, слюсар-складальник може виконувати базові операції контролера відділу технічного контролю. Це забезпечить взаємозамінність всередині гнучкої комірки.

З іншої сторони, у ГВК бажано запровадити матеріальну мотивацію працівників та соціальну підтримку. Окрім премій за виконання плану, необхідно ввести бонуси за освоєння нової операції, подання раціоналізаторської пропозиції щодо зменшення затрат, наставництво для нових працівників. Організація роботи психологічної служби на підприємстві допоможе робочим подолати стрес та тривожність, що пов'язані із війною. Стабільний психоемоційний стан персоналу є прямою запорукою продуктивності та якості роботи.

Впровадження гнучких комірок та цифрових інструментів дозволить скоротити час переналагодження та цикл складання виробу. Водночас оптимізація логістики та управління запасами підвищить коефіцієнт використання робочого часу за рахунок зменшення простоїв.

Висновки

Удосконалення роботи механоскладальної дільниці в умовах воєнного стану є складним, багатоаспектним завданням, що виходить за межі традиційних методів оптимізації. Запропонований у статті підхід базується на синергії принципів організаційної гнучкості, технологічної адаптації та орієнтованого на стійкість управління, дозволяє сформувати виробничу систему ефективного протистояння викликам війни.

Перехід від жорстких лінійних структур до гнучких виробничих комірок, інтеграція адитивних технологій та цифрових інструментів, реінжиніринг ланцюгів постачання та впровадження адаптивних моделей управління персоналом створюють необхідну базу для забезпечення не лише виживання, але й розвитку виробництва. Реалізація цих заходів дозволить підвищити стійкість дільниці до зовнішніх шоків, скоротити виробничий цикл, мінімізувати втрати обмежених ресурсів та забезпечити стабільну якість продукції, що є критично важливим для обороноздатності та економічної безпеки України. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку кількісних моделей для оцінки рівня стійкості виробничих систем та економічного обґрунтування інвестицій у запропоновані інновації.

Список використаної літератури

1. Беліменко О. І., Блакита Г. В. Економічна стійкість підприємств в умовах війни. *Збірник наукових праць ТДАТУ імені Дмитра Моторного*. 2025. №1(54). С. 17–25. DOI: https://doi.org/10.32782/2519-884X-2025-54-2

2. Боковець В., Пілявоз Т., Григорук І. Забезпечення стабільного розвитку та економічної стійкості підприємств в умовах сучасних викликів. *Herald of Khmelnytskyi National University*. 2025. № 1. С. 465–468. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-338-68

3. Чибіряк Я. І., Ващенко С. М., Алексенко О. В., Дерев'янчук А. Й. Підвищення ефективності складальних процесів у машинобудуванні. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2012. Вип. 121. С. 137–141. DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2012_121_26

4. Rouhollah Khakpour, Ahmad Ebrahimi, Seyed-Mohammad Seyed-Hosseini; Lean process mining: adopting process mining in lean manufacturing for dynamic process mapping and avoiding waste occurrence in real time. *International Journal of Lean Six Sigma*. 2025. №16 (1). pp. 231–255. DOI: https://doi.org/10.1108/IJLSS-03-2024-0059

5. Fenta E. W., Tsegaye A. A., Abere A. E. Opportunities in Flexible Manufacturing Systems in the Near Future. *Glob J Flex Syst Manag*. 2025. №26. pp. 247–267. DOI: https://doi.org/10.1007/s40171-025-00437-z

6. Gupta S., Singh R. K., Amrit C. Integrating Industry 4.0 with Circular Economy Approach for Sustainable and Flexible Manufacturing Systems. *Glob J Flex Syst Manag*. 2025. №26. pp. 115–145. DOI: https://doi.org/10.1007/s40171-025-00438-y

7. Roumieh N., Shibani A., Almijrab A., Ahmed M., Arbouche O., Hassan D. Managing Risks Based Scrum/Kanban Methodologies in Construction Industry. *Journal of Engineering and Management Studies*. 2025. Vol. 1. № 1. pp. 1–7. URL: https://jenams.com/wp-content/uploads/2025/03/01.01.25-journal-of-Engineering-and-Management-Studies-.pdf

8. Aguilar-Landaeta C. C., García-Saona J. K., Meza-Ortiz R. N. Lean Manufacturing Implementation in Textile Dyeing: A Study of Process Optimization and Waste Reduction in a Peruvian SME. *International Journal of Recent Engineering Science*. 2025. Vol. 12. №3. pp. 35–46. DOI: https://doi.org/10.14445/23497157/IJRES-V12I3P105

9. Скорупський К. С. Стратегії управління виробництвом в умовах війни. *Актуальні питання економічних наук*. 2025. №7. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.14911617

10. Ульянченко Н. Стратегія управління підприємством в умовах воєнного стану. *Herald of Khmelnytskyi National University*. 2025. 342(3(1). С. 293–297. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-342-3(1)-41

11. Nwamekwe C. O., Vitalis E. N., Igbokwe N. C., Nwabunwanne E. C., Ono C. G. Digital Twin-Driven Lean Manufacturing: Optimizing Value Stream Flow. *Letters in Information Technology Education (LITE)*. 2025. № 8(1). pp. 1–13. URL: https://hal.science/hal-05127340

12. Li L., Qu T., Liu Y., Zhong R. Y., Xu G., Sun H., Gao Y., Lei B., Mao C., Pan Y., Wang F., Ma C. Sustainability assessment of intelligent manufacturing supported by digital twin. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. pp. 174988–175008. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3026541

13. Сонець О. В., Воронцов Б. С. Особливості виготовлення деталей адитивними технологіями з металевих сплавів. Аналітичний огляд. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2025. 9(2(105). С. 185–194. DOI: https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.2(105).326824

14. Wang X, Gong X, Chou K. Review on powder-bed laser additive manufacturing of Inconel 718 parts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2016. Vol. 231(11). pp. 1890–1903. DOI: https://doi.org/10.1177/0954405415619883

15. Абрашкевич Ю. Д., Пелевін Л. Є., Марченко О. А. Процеси гнучких виробництв: навч. посібник. Київ : КНУБА, 2019. 212 с.

References

1. Belimenko, O. I., & Blakyta, H. V. (2025) Ekonomichna stiikist pidpryiemstv v umovakh viiny [Economic stability of enterprises in wartime]. *Zbirnyk naukovykh prats TDATU imeni Dmytra Motornoho*, 1(54), pp. 17–25. DOI: https://doi.org/10.32782/2519-884X-2025-54-2 [in Ukrainian].

2. Bokovets, V., Piliavoz, T., & Hryhoruk, I. (2025) Zabezpechennia stabilnoho rozvytku ta ekonomichnoi stiikosti pidpryiemstv v umovakh suchasnykh vyklykiv [Ensuring stable development and economic sustainability of enterprises in the face of modern challenges]. *Herald of Khmelnytskyi National University*, 1, pp. 465–468. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-338-68 [in Ukrainian].

3. Chybiriak, Ya. I., Vashchenko, S. M., Aleksenko, O. V., & Derevianchuk, A. Y. (2012) Pidvyshchennia efektyvnosti skladalnykh protsesiv u mashynobuduvanni [Improving the efficiency of assembly processes in mechanical engineering]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka*, Vol. 121, pp. 137–141. DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2012_121_26 [in Ukrainian].

4. Rouhollah, Khakpour, Ahmad, Ebrahimi, Seyed-Mohammad, & Seyed-Hosseini (2025) Lean process mining: adopting process mining in lean manufacturing for dynamic process mapping and avoiding waste occurrence in real time. *International Journal of Lean Six Sigma*, 16(1), pp. 231–255. DOI: https://doi.org/10.1108/IJLSS-03-2024-0059

5. Fenta, E. W., Tsegaye, A. A., & Abere, A. E. (2025) Opportunities in Flexible Manufacturing Systems in the Near Future. *Glob J Flex Syst Manag*, 26, pp. 247–267. DOI: https://doi.org/10.1007/s40171-025-00437-z

6. Gupta, S., Singh, R. K., & Amrit, C. (2025) Integrating Industry 4.0 with Circular Economy Approach for Sustainable and Flexible Manufacturing Systems. *Glob J Flex Syst Manag*, 26, pp. 115–145. DOI: https://doi.org/10.1007/s40171-025-00438-y

7. Roumieh, N., Shibani, A., Almijrab, A., Ahmed, M., Arbouche, O., & Hassan, D. (2025) Managing Risks Based Scrum/Kanban Methodologies in Construction Industry. *Journal of Engineering and Management Studies*, Vol. 1, 1, pp. 1–7. URL: https://jenams.com/wp-content/uploads/2025/03/01.01.25-journal-of-Engineering-and-Management-Studies-.pdf

8. Aguilar-Landaeta, C. C., García-Saona, J. K., & Meza-Ortiz, R. N. (2025) Lean Manufacturing Implementation in Textile Dyeing: A Study of Process Optimization and Waste Reduction in a Peruvian SME. *International Journal of Recent Engineering Science*, Vol. 12, 3, pp. 35–46. DOI: https://doi.org/10.14445/23497157/IJRES-V12I3P105

9. Skorupskyi, K. S. (2025) Stratehii upravlinnia vyrobnytstvom v umovakh viiny [Production management strategies in wartime]. *Aktualni pytannia ekonomichnykh nauk*, 7. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.14911617 [in Ukrainian].

10. Ulianchenko, N. (2025) Stratehiia upravlinnia pidpryiemstvom v umovakh voiennoho stanu [Business management strategy in conditions of martial law]. *Herald of Khmelnytskyi National University*, 342(3(1), pp. 293–297. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-342-3(1)-41 [in Ukrainian].

11. Nwamekwe, C. O., Vitalis, E. N., Igbokwe, N. C., Nwabunwanne, E. C., & Ono, C. G. (2025) Digital Twin-Driven Lean Manufacturing: Optimizing Value Stream Flow. *Letters in Information Technology Education (LITE)*, 8(1), pp. 1–13. URL: https://hal.science/hal-05127340

12. Li, L., Qu, T., Liu, Y., Zhong, R. Y., Xu, G., Sun, H., Gao, Y., Lei, B., Mao, C., Pan, Y., Wang, F., & Ma, C. (2020) Sustainability assessment of intelligent manufacturing supported by digital twin. *IEEE Access*. Vol. 8. pp. 174988–175008. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3026541

13. Sonets, O. V., & Vorontsov, B. S. (2025) Osoblyvosti vyhotovlennia detalei adytyvnymy tekhnolohiiamy z metalevykh splaviv. Analitychnyi ohliad [Features of manufacturing parts using additive technologies from metal alloys. Analytical review]. *Mechanics and Advanced Technologies*, 9(2(105), pp. 185–194. DOI: https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.2(105).326824 [in Ukrainian]

14. Wang, X., Gong, X., & Chou, K. (2016) Review on powder-bed laser additive manufacturing of Inconel 718 parts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 231(11), pp. 1890–1903. DOI: https://doi.org/10.1177/0954405415619883

15. Abrashkevych, Yu. D., Pelevin, L. Ye., & Marchenko, O. A. Protsesy hnuchkykh vyrobnytstv: navch. posibnyk [Flexible manufacturing processes: textbook]. Kyiv : KNUBA, 2019. 212 c. [in Ukrainian]

Дата першого надходження рукопису до видання: 19.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 17.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 577.23:665.939.35 (045) DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.16

А. Ю. КАРАЮМЕР
аспірант кафедри хімії і хімічної технології
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0002-7031-1096

А. Д. КУСТОВСЬКА
кандидат хімічних наук, доцент кафедри хімії і хімічної технології
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0002-6836-3305

БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ МОРСЬКИХ ТРАВ РОДИНИ *ZOSTERACEAE*: ЦІЛЬОВІ КОМПОНЕНТИ, МЕТОДИ ВИЛУЧЕННЯ ТА НАПРЯМИ ЗАСТОСУВАННЯ

У статті розглянуто біотехнологічний потенціал морських трав родини Zosteraceae з акцентом на вид Zostera marina Чорноморського басейну. Проаналізовано їхнє екологічне значення як ключових елементів прибережних екосистем та одночасно – проблему щорічних штормових викидів, які залишаються малоефективно використаним ресурсом. Узагальнено сучасні дані щодо хімічного складу біомаси, що включає полісахариди (целюлоза, геміцелюлози, пектини), ліпіди, фенольні метаболіти та мінеральні елементи. Визначено напрями їхнього прикладного використання у виробництві біопалива, харчових і фармацевтичних продуктів, а також у целюлозно-паперовій галузі та створенні біокомпозитів. Підкреслено, що Zostera marina протягом тривалого історичного періоду використовувалася в Європі та на узбережжі Чорного моря як традиційний природний ресурс, проте нині її потенціал розглядається у контексті сучасних наукових і технологічних викликів. Особливу увагу приділено аналізу методів вилучення цільових компонентів, серед яких органічна та надкритична екстракція, ферментативний гідроліз і мікробіологічна ферментація, що дозволяють підвищити ефективність переробки та отримати продукти з високою доданою вартістю. Показано, що комплексна переробка біомаси Zosteraceae на основі багатостадійних технологій здатна забезпечити безвідходність виробництва й інтегруватися у модель циркулярної економіки. Зроблено висновок, що раціональне використання штормових викидів морських трав може водночас знизити екологічне навантаження на прибережні території, сприяти створенню інноваційних виробництв в Україні та стати підґрунтям для розвитку «синьої біоекономіки», забезпечуючи інтеграцію у сучасні європейські стратегії сталого розвитку.

Ключові слова: *морські трави, біомаса, біоенергетика, циркулярна економіка, сталий розвиток, відходи.*

A. YU. KARAIUMER
Postgraduate Student at the Department of Chemistry
and Chemical Technology
State University “Kyiv Aviation Institute”
ORCID: 0000-0002-7031-1096

A. D. KUSTOVSKA
Ph.D., Associate Professor at the Department of Chemistry
and Chemical Technology
State University “Kyiv Aviation Institute”
ORCID: 0000-0002-6836-3305

BIOTECHNOLOGICAL POTENTIAL OF SEAWEEDS OF THE ZOSTERACEAE FAMILY: TARGET COMPONENTS, EXTRACTION METHODS AND DIRECTIONS OF APPLICATION

This article explores the biotechnological potential of seagrasses of the family Zosteraceae, with a particular emphasis on Zostera marina from the Black Sea basin. The ecological role of these species as keystone components of coastal ecosystems is considered, alongside the issue of annual storm-cast accumulations, which remain an insufficiently utilized biomass resource. Contemporary knowledge on the chemical composition of Z. marina is summarized, highlighting polysaccharides (cellulose, hemicelluloses, pectins), lipids, phenolic metabolites, and mineral elements. Potential application areas are identified, including the production of biofuels, functional food and pharmaceutical ingredients, paper and packaging materials, as well as plant-based biocomposites. Particular attention is given to extraction

© Караюмер А. Ю., Кустовська А. Д., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

and processing approaches – such as organic and supercritical fluid extraction, enzymatic hydrolysis, and microbial fermentation – that allow efficient recovery of target compounds and support the development of high value-added products. It is argued that the integrated, multistage processing of Zosteraceae biomass can ensure waste minimization, foster the transition to circular economy models, and contribute to the sustainable use of marine resources. The rational utilization of storm-cast seagrasses is concluded to provide dual benefits: mitigating environmental pressure on Black Sea coastal ecosystems and creating a foundation for innovative, resource-efficient industries in Ukraine. These findings highlight the potential of Zosteraceae to support the advancement of the blue bioeconomy and align national priorities with modern European sustainable development strategies.

Key words: *seagrasses, biomass, bioenergy, circular economy, sustainable development, waste.*

Постановка проблеми

Морські трави родини *Zosteraceae* відіграють ключову роль у функціонуванні прибережних екосистем Чорного моря, зокрема беруть участь у стабілізації донних відкладень, акумуляції вуглецю та створенні середовищ існування для різних груп гідробіонтів. Водночас щорічні штормові процеси спричиняють значні викиди біомаси на узбережжя, де вона накопичується, формуючи додаткові екологічні та санітарні проблеми, що особливо актуально в періоди рекреаційного навантаження. Традиційно зібрані відходи видаляють шляхом механічного очищення берегової лінії з подальшим захороненням або спалюванням, що не лише суперечить принципам екологічної безпеки, але й призводить до нераціональної втрати природних ресурсів [1, 2].

Біомаса *Zostera marina* характеризується високим вмістом полісахаридів (целюлоза, геміцелюлоза, пектинові речовини), ліпідів, фенольних та інших біоактивних сполук [3, 4]. Такий склад обумовлює перспективність комплексної переробки цієї сировини для отримання продуктів різного функціонального призначення – від біопалива та фармацевтичних субстанцій до біоактивних екстрактів і волокнистих матеріалів. Проте наразі відсутні інтегровані технологічні рішення, що одночасно забезпечували б утилізацію штормових викидів і ефективне вилучення цінних компонентів. Це призводить до втрати значного науково-технічного та економічного потенціалу біомаси *Zosteraceae*. Зазначене визначає необхідність розроблення інноваційних підходів, орієнтованих на зменшення екологічного навантаження прибережних зон та формування доданої вартості у межах концепції циркулярної економіки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Історичні відомості засвідчують, що морські трави роду *Zostera* здавна використовувалися у прибережних регіонах Європи та Середземномор'я як органічне добриво, теплоізоляційний матеріал, підстилка для тварин та покрівельна сировина [5, 6]. У подальшому інтерес до цієї біомаси поступово змістився від побутового застосування до вивчення її хімічного складу та біологічної активності. Рисунок 1 демонструє хронологію досліджень *Zostera marina*.

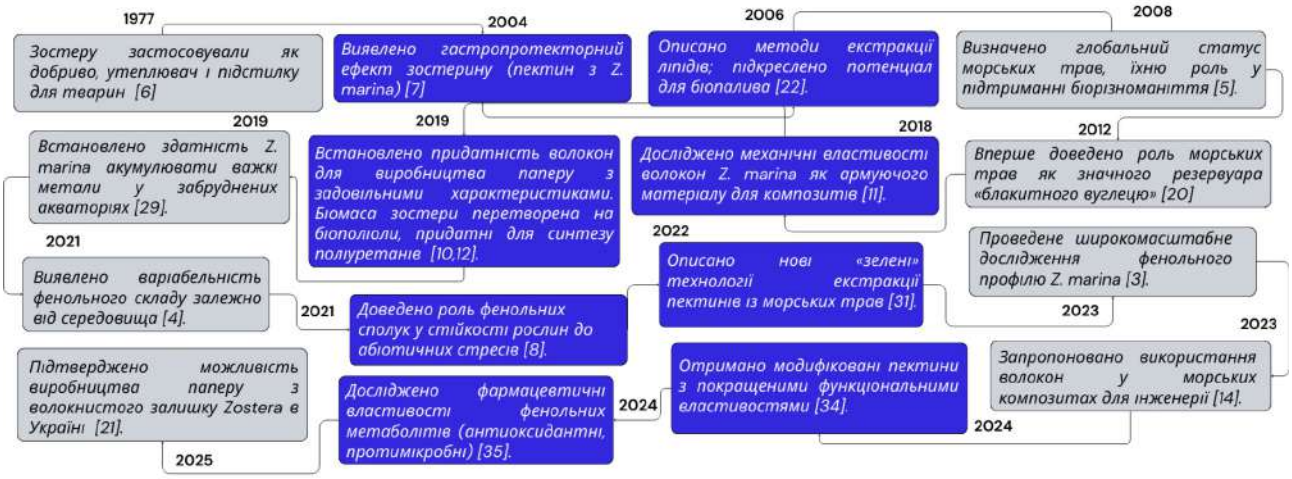


Рис. 1. Хронологія досліджень складу морських трав *Zostera marina*

На сучасному етапі наукові дослідження окреслюють два пріоритетні напрями. Перший пов'язаний із поглибленим аналізом хімічного складу *Zostera marina* та дослідженням функціональних властивостей її компонентів. Зокрема, встановлено гастропротекторну дію пектинових речовин зостерину [7], а також значну географічну варіабельність фенольних метаболітів, що зумовлює відмінності у біоактивності рослинної сировини [8, 9]. Другий напрям стосується розроблення практичних сфер застосування, серед яких фармацевтична та харчова промисловість, біоенергетика, виробництво біополімерів і целюлозно-паперових матеріалів [10–12].

Важливе місце у науковому дискурсі посідає дослідження екологічних функцій луків родини *Zosteraceae*. Наголошується на їхній ролі як екосистемних інженерів, що беруть участь у секвестрації «блакитного вуглецю»,

стабілізації донних відкладень і збереженні біорізноманіття прибережних акваторій [15, 16]. Це зумовлює подвійне значення біомаси морських трав: як сировини для отримання цінних продуктів і як чинника підтримання екологічної стійкості морських екосистем.

У європейському контексті дослідження інтегруються у концепцію «синьої біоекономіки», що спрямована на залучення морських біоресурсів у циркулярні моделі сталого виробництва. У відповідних аналітичних документах підкреслюється доцільність трансформації штормових викидів у продукти з високою доданою вартістю, що водночас сприяє зменшенню антропогенного навантаження на прибережні зони [17, 18].

Разом з тим, у літературі окреслюється низка наукових прогалин. Недостатньо дослідженими залишаються технологічні параметри комплексної переробки біомаси *Zostera marina*, вплив сезонних і географічних чинників на її якісний склад, а також підходи до масштабування запропонованих технологій для промислового використання. Вирішення зазначених завдань визначає актуальність і практичну значущість подальших досліджень у цій сфері.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи полягає в аналізі можливостей практичного використання біомаси морських трав родини *Zosteraceae* Чорноморського басейну в Україні шляхом розробки підходів до комплексної переробки та одержання цільових продуктів (ліпідів, пектинів, фенольних сполук, целюлозних матеріалів). Особливу увагу зосереджено на перспективах інтеграції таких технологій у фармацевтичну, харчову, біоенергетичну та целюлозно-паперову галузі для створення доданої вартості та розвитку «синьої біоекономіки».

Викладення основного матеріалу дослідження

Родина *Zosteraceae* включає близько 15 видів морських трав, серед яких найбільш поширеною у північній півкулі є *Zostera marina L*. Це вищі квіткові рослини, які в процесі еволюції адаптувалися до морського середовища, зберігши фотосинтетичну активність та здатність до вегетативного розмноження. Їхні зарості формують підводні біоценози, що виконують важливі екосистемні функції.

Ареал поширення *Z. marina* (рис. 2) охоплює прибережні зони Північної Атлантики, Балтійського та Чорного морів, а також північні регіони Тихого океану. У Чорному морі основні угруповання зосереджені у північно-західній частині шельфу, у затоці Сиваш, біля узбережжя Кримського півострова та Одеської області. Дослідження, проведені в Україні, свідчать про зменшення площ поширення *Z. marina*, що зумовлено антропогенним навантаженням, евтрофікацією, підвищенням температури води та військовими діями від 24 лютого 2022 року [19, 20].

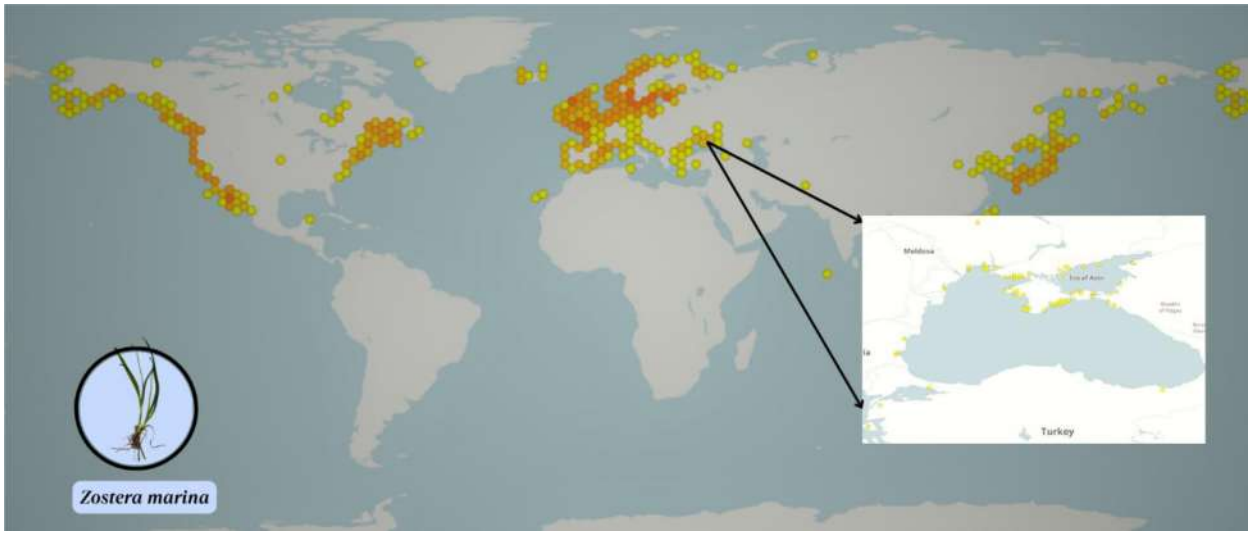


Рис. 2. Географічне поширення морської трави родини *Zosteraceae*

Екологічна роль представників *Zosteraceae* багатофункціональна. Вони здійснюють фотосинтез у прибережних акваторіях, виступають ефективним резервуаром секвестрації вуглецю (до 83 млн т на рік у глобальному масштабі) [20], стабілізують донні відкладення та знижують інтенсивність берегової ерозії. Крім того, зарості створюють біотопи для ранніх стадій розвитку риб, молюсків та інших безхребетних [21].

Характерним явищем для Чорного моря є штормові викиди морських трав, унаслідок яких значні обсяги біомаси накопичуються на береговій лінії. За даними Міністерства захисту довкілля України, такі відходи створюють екологічне навантаження на прибережні території та рекреаційну інфраструктуру. Найпоширенішим способом їх утилізації залишається механічне прибирання з подальшим захороненням [19], що не враховує можливостей використання цієї сировини. Біомаса морських трав родини *Zosteraceae* відзначається різноманітним хімічним складом, який визначає її біотехнологічний потенціал. Основними компонентами є полісахариди (целюлоза,

геміцелюлози, пектини), ліпіди, білкові сполуки, фенольні метаболіти та мінеральні елементи. Завдяки цьому можливе цільове використання окремих фракцій у харчовій, фармацевтичній, біоенергетичній та матеріалознавчій галузях, що схематично наведено на рисунку 3.



Рис. 3. Сфери застосування та приклади продуктів отриманих з морських трав *Zosteraceae*

Вміст ліпідів становить у середньому 2–6 % від сухої маси, при цьому понад 60 % припадає на ненасичені жирні кислоти, серед яких омега-3 та омега-6, що визначає їхню високу біологічну цінність [22, 23, 32, 33]. Пектинові речовини складають 10–15 % сухої маси й характеризуються гелеутворюючими, ентеросорбційними та антиоксидантними властивостями [21, 25]. Фенольні метаболіти представлені флавоноїдами, фенолкарбоновими кислотами та танінами, які виконують захисні функції та проявляють антиоксидантну й протимікробну активність [8, 9, 36]. Целюлозний комплекс становить 25–35 % сухої маси і відзначається зниженою кристалічністю, що спрощує його переробку порівняно з деревиною [25]. Додатково у біомасі містяться макро- та мікроелементи (Ca, Mg, K, Fe, I), що відкриває можливості використання подрібненої сировини у вигляді органо-мінеральних добрив.

Для поетапного вилучення цільових компонентів застосовуються фізико-хімічні та біотехнологічні методи. Ліпіди та фенольні сполуки отримують шляхом екстракції органічними розчинниками (гексан, етанол, метанол) або за допомогою надкритичного CO_2 [26], що відповідає принципам «зеленої хімії». Пектинові речовини ізолюють із використанням водно-спиртових систем або розбавлених мінеральних кислот, забезпечуючи вихід на рівні 10–15 % [21]. Волокнистий залишок після вилучення пектину й ліпідів може бути використаний як сировина для паперу, картону чи біокомпозитів. Перспективними є також ферментативний гідроліз і мікробна ферментація, які дають змогу отримувати біоетанол, біогаз та інші продукти [27].

Комплексна схема переробки біомаси *Zosteraceae* (рис. 4) включає кілька етапів, а саме: *вилучення ліпідної фракції* органічними розчинниками або надкритичним CO_2; *екстракцію пектину* водно-кислотними системами при оптимальних температурах (80–90 °C); *виділення фенольних сполук* і антиоксидантів водно-спиртовими екстрактами та використання *волокнистого залишку* для виготовлення паперових матеріалів, біокомпозитів або як субстрату в біогазових установках. Така багатостадійна схема спрямована на зменшення кількості відходів і узгоджується з принципами циркулярної економіки. Приклади її застосування описані для бурих і зелених водоростей, проте дослідження, орієнтовані на морські трави роду *Zostera*, перебувають на початкових стадіях [28, 29].

Поєднання фізико-хімічних та біотехнологічних методів створює підґрунтя для формування ефективних технологічних процесів комплексної переробки. Актуальним науковим завданням є оптимізація технологічних параметрів із урахуванням сезонності та географічного походження сировини, а також розробка промислових регламентів для масштабного впровадження.

Практичні напрями використання біомаси *Zostera marina* охоплюють широкий спектр галузей, що представлені у таблиці 1. Ліпідна фракція є придатною для виробництва біодизельного палива, харчових добавок і косметичних засобів [32, 33]; залишкова біомаса може слугувати субстратом для анаеробної ферментації з утворенням біогазу. Целюлозні компоненти використовуються як основа для отримання біоетанолу, паперових матеріалів [21] та біорозкладних композитів. Пектини мають значний фармацевтичний потенціал як ентеросорбенти та допоміжні речовини у лікарських формах, а також застосовуються у харчовій промисловості як натуральні загусники та стабілізатори [34, 35]. Фенольні сполуки завдяки антиоксидантній та антимікробній активності можуть бути використані у фармацевтиці, харчових технологіях і косметиці [36–39].

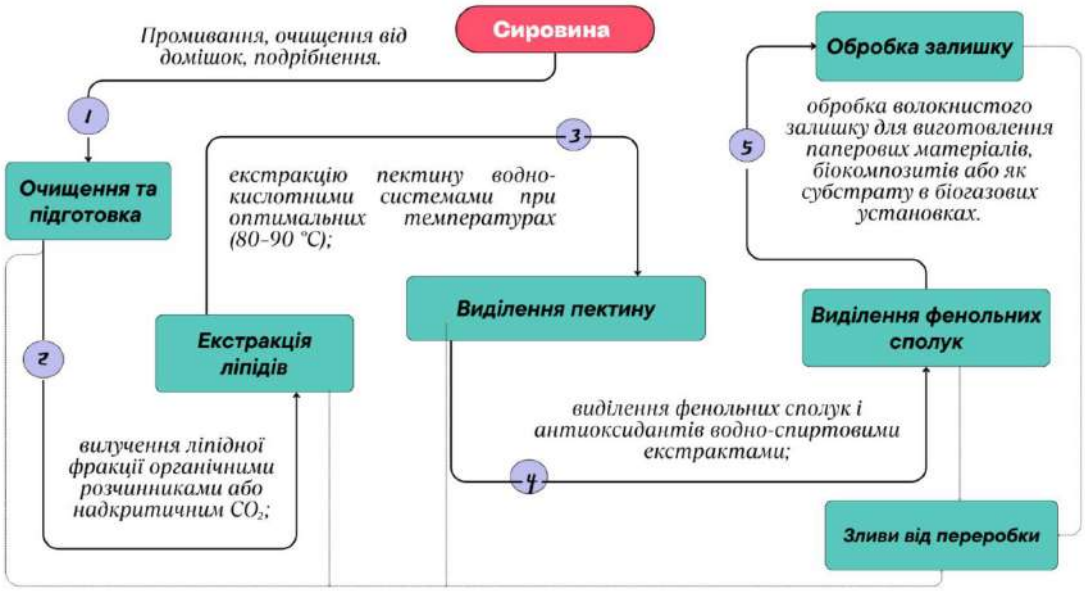


Рис. 4. Основні етапи схеми комплексної переробки морських водоростей роду Zostera

Таблиця 1

Цільові продукти біомаси *Zostera marina*, вміст і напрями застосування

Продукт	Вміст у сухій біомасі, %	Сфера застосування	Приклади речовин
Ліпіди	2–6 %	Біоенергетика, харчова, косметична промисловість	Ненасичені жирні кислоти (омега-3, омега-6) [10, 23, 27, 29]
Пектинові речовини	10–15 %	Харчова та фармацевтична промисловість	Пектини, зостерин [7, 34, 35]
Фенольні метаболіти	0,03–0,75 %	Фармацевтика, харчова промисловість, матеріалознавство	Флавоноїди, фенолкарбонові кислоти, таніни [3, 4, 9, 24, 36]
Целюлозний комплекс	25–35 %	Целюлозно-паперова промисловість, біокомпозити, пакувальні матеріали	Целюлоза, геміцелюлози [11, 12, 14, 21, 25]

Якість та кількість цільових компонентів біомаси визначаються поєднанням природних і технологічних чинників. Весняна біомаса містить підвищені концентрації білків і вуглеводів, тоді як восени збільшується частка структурних полісахаридів (30–35 %) [31]. Максимальний вміст пектину спостерігається у період активної вегетації [31], тоді як ліпідна фракція найбільш багата жирними кислотами у літньо-осінній період [31–33], що важливо для біопаливних застосувань. Вміст мінеральних елементів і полісахаридів варіює залежно від географічного походження: у Чорному морі показники відрізняються від аналогічних у Балтійському та Північному морях, що зумовлено відмінностями у солоності, температурі та рівні антропогенного навантаження [29, 30]. У зонах із підвищеним рівнем забруднення відзначається накопичення важких металів (Pb, Cd, Hg), що вимагає попереднього очищення або селективної утилізації такої біомаси [29, 30].

Ефективність подальшої переробки значною мірою визначається умовами збору й підготовки сировини. Механічне прибирання штормових викидів часто супроводжується домішками піску й мулу, що знижує якість біомаси. Попереднє промивання морською або прісною водою, сушіння при 40–60 °C та подрібнення підвищують вихід пектину та покращують властивості волокнистих залишків [31–33]. Зберігання сирої біомаси понад 48–72 годин призводить до втрати біоактивних компонентів унаслідок мікробних і ферментативних процесів [31]. Додатково кліматичні зміни – підвищення температури води, підкислення, евтрофікація – негативно впливають на продуктивність водоростей Zosteraceae та їхній біохімічний склад [29, 30].

Таким чином, *Zostera marina* становить перспективне джерело біомаси для комплексної багатостадійної переробки, яка передбачає вилучення ліпідів, пектинів, фенольних метаболітів та використання целюлозних залишків у матеріалознавстві й енергетиці [21–29, 32–39]. Раціональне залучення штормових викидів у виробничі ланцюги дозволяє поєднати завдання зменшення екологічного навантаження на узбережжя із формуванням нових секторів «синьої біоекономіки». Це створює підґрунтя для впровадження ресурсоефективних технологій у Чорноморському регіоні та сприяє інтеграції України у сучасні європейські стратегії сталого розвитку [28, 29].

Висновки

Морські трави родини Zosteraceae, зокрема *Zostera marina*, є перспективним джерелом біомаси для комплексної переробки. Штормові викиди цих рослин можуть стати цінною сировиною для фармацевтичної, харчової,

біоенергетичної та целюлозно-паперової промисловості. Хімічний склад біомаси включає пектинові речовини (10–15 %), целюлозу (25–35 %), ліпіди (2–6 %) та фенольні метаболіти. Пектини проявляють гастропротекторні й антиоксидантні властивості, феноли – антиоксидантну та протимікробну активність, ліпіди придатні для виробництва біодизелю й харчових добавок, а волокнистий залишок може бути використаний для паперу та біокомпозитів.

Перспективним напрямом є впровадження багатостадійних технологічних схем, що поєднують фізико-хімічні та біотехнологічні методи і враховують сезонну та географічну варіабельність складу біомаси. Такий підхід відповідає принципам циркулярної економіки, сприяє зменшенню екологічного навантаження на Чорноморський регіон і створює передумови для розвитку секторів «синьої біоекономіки» та інтеграції України у сучасні європейські стратегії сталого розвитку.

Список використаної літератури

1. Ukrainian Scientific Centre of Ecology of the Sea (UkrSCES). State Monitoring Programme of the Black and Azov Seas. Київ : Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine, 2022. URL: https://sea.gov.ua/?lang=en (дата звернення: 11.09.2025).

2. Greenpeace. Pressures, Threats and Impacts on Life in the Black Sea : Greenpeace Report. 2024. URL: https://www.greenpeace.org/static/planet4-romania-stateless/2024/05/5bacf577-02_pressures-threats-and-impacts-on-life-in-the-black-sea_greenpeace_rev02-1-1.pdf (дата звернення: 11.09.2025).

3. Grignon-Dubois M., Rezzonico B. Phenolic chemistry of the seagrass Zostera marina Linnaeus: First assessment of geographic variability among populations on a broad spatial scale. Phytochemistry. 2023. Vol. 213. Art. 113788. DOI: 10.1016/j.phytochem.2023.113788

4. Uchida M., Miyoshi T., Kaneniwa M., Ishihara K., Nakashimada Y., Urano N. Production of 16.5 % v/v ethanol from seagrass seeds. J. Biosci. Bioeng. 2014. Vol. 118, № 6. С. 646–650. DOI: 10.1016/j.jbiosc.2014.05.017

5. Duarte C. M., Borum J., Short F. T., Walker D. I. Seagrass ecosystems: their global status and prospects. У кн.: Polunin N. V. C. (ed.) Aquatic Ecosystems: Trends and Global Prospects. Cambridge : Cambridge University Press, 2008. С. 281–294.

6. Rasmussen E. Seagrasses: Their uses, threats and management. Aquatic Botany. 1977. Vol. 3, Issue 4. С. 297–308. DOI: 10.1016/0304-3770(77)90030-1

7. Bessonova V. P., Malyarenko O. S., Stonik V. A., Elyakov G. B. Zosterin – pectin from seagrass Zostera marina with gastroprotective effect. Hydrobiological Journal. 2004. Vol. 40, № 3. С. 85–92. DOI: 10.1615/HydrobJ.v40.i3.80

8. Bociag K., Stawicka A., Urbaniak M., та ін. Phenolic chemistry of the seagrass Zostera marina: Geographic variability among populations. Aquatic Botany. 2021. Vol. 171. Art. 103393. DOI: 10.1016/j.aquabot.2021.103393

9. Sævdal Dybsland C., Bekkby T., Hasle Enerstvedt K., Kvalheim O. M., Rinde E., Jordheim M. Variation in Phenolic Chemistry in Zostera marina Seagrass along Environmental Gradients. Plants. 2021. Vol. 10, № 2. Art. 334. DOI: 10.3390/plants10020334. URL: https://www.mdpi.com/2223-7747/10/2/334 (дата звернення: 12.09.2025).

10. Li H., Zhu Y., Cao W., та ін. Liquefaction of marine biomass into bio-polyols for polyurethane foams. Cellulose. 2019. Vol. 26. С. 4807–4819. DOI: 10.1007/s10570-019-02394-3

11. Choi J., Choi S., Kim Y., та ін. Mechanical properties of seagrass fibers for composites. BioResources. 2018. Vol. 13, № 2. С. 2820–2831. DOI: 10.15376/biores.13.2.2820-2831

12. Liu C., Guo R., Zhang Y., та ін. Papermaking properties of seagrass fibers. BioResources. 2019. Vol. 14, № 2. С. 2671–2684. DOI: 10.15376/biores.14.2.2671-2684

13. Fragassa C., Pavlovic A., Santulli C. Seagrass fibres as sustainable reinforcements for polymer-based composites: A review. Polymers. 2025. Vol. 17, № 3. Art. 567. DOI: 10.3390/polym17030567

14. Crupi V., Majolino D., Fazio B., та ін. Seagrass-based natural fibres: Potential applications in marine composites. Marine Structures. 2023. Vol. 87. Art. 103385. DOI: 10.1016/j.marstruc.2023.103385

15. Fourqurean J. W., Manuel S. A., Kendrick G. A., та ін. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. Frontiers in Marine Science. 2023. Vol. 10. Art. 112233. DOI: 10.3389/fmars.2023.112233

16. Waycott M., Duarte C. M., Carruthers T. J. B., та ін. Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. Hydrobiologia. 2023. Vol. 887. С. 1–19. DOI: 10.1007/s10750-023-05124-4

17. European Commission. Blue Bioeconomy Report 2022. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2022. DOI: 10.2777/0186

18. Salvador J., та ін. Blue growth and the role of seagrass biomass in sustainable bioeconomy. Journal of Cleaner Production. 2025. Vol. 432. Art. 139847. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.139847

19. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні (2021). Київ : МЗДПР, 2021. URL: https://mepr.gov.ua (дата звернення: 12.09.2025).

20. Davies P., Morvan C., Sire O., та ін. Structure and properties of fibres from seagrass (Zostera marina). J. Mater. Sci. 2007. Vol. 42. C. 4850–4857. DOI: 10.1007/s10853-006-0546-1

21. Караюмер А. Ю., Кустовська А. Д. Використання волокнистих відходів комплексної переробки водоростевої біомаси роду Zostera для виробництва паперових матеріалів. Наукоємні технології. 2025. № 2(66). С. 278–287.

22. Herrero M., Cifuentes A., Ibáñez E. Sub- and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: Plants, food-by-products, algae and microalgae: A review. Food Chemistry. 2006. Vol. 98, № 1. С. 136–148. DOI: 10.1016/j.foodchem.2005.05.058

23. Guschina I. A., Harwood J. L. Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae. Progress in Lipid Research. 2006. Vol. 45. С. 160–186. DOI: 10.1016/j.plipres.2006.10.005

24. Uwineza P. A., Waśkiewicz A. Recent advances in supercritical fluid extraction of natural bioactive compounds from plant materials. Molecules. 2020. Vol. 25, № 17. Art. 3847. DOI: 10.3390/molecules25173847. URL: https://www.mdpi.com/1420-3049/25/17/3847 (дата звернення: 14.09.2025).

25. Holdt S. L., Kraan S. Bioactive compounds in seaweed: Functional food applications and legislation. Journal of Applied Phycology. 2011. DOI: 10.1007/s10811-010-9632-5

26. Shikov A. N., Pozharitskaya O. N., Makarov V. G., Kvetnaya A. S. Zostera marina L.: Supercritical CO2-Extraction and Mass Spectrometric Characterization of Chemical Constituents Recovered from Seagrass. Frontiers in Marine Science. 2022. Vol. 9. Art. 182. DOI: 10.3389/fmars.2022.860273

27. Park J. S., Jung S. M., Lee D. Y., Kang B. J., Lee W. C. Heavy metal accumulation and phytoremediation potential by transplants of the seagrass Zostera marina in polluted bay systems. Marine Pollution Bulletin. 2019. Vol. 149. Art. 110650. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.110650

28. Martins A., Vieira H., Gaspar H., Santos S. A Comprehensive Update on the Bioactive Compounds from Seagrasses. Marine Drugs. 2022. Vol. 20, № 7. С. 456. DOI: 10.3390/md20070456

29. Lomartire S., Gonçalves A. M. M. Novel Technologies for Seaweed Polysaccharides Extraction and Their Use in Food with Therapeutically Applications. Foods. 2022. Vol. 11, № 19. С. 3654. DOI: 10.3390/foods11193654

30. Balestri E., Vallerini F., Castelli A., Lardicci C. Use of bio-containers from seagrass wrack with nursery planting to improve the eco-sustainability of coastal habitat restoration. Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 251. Art. 109594. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109594

31. Torres M. D., Kraan S., Domínguez H. A Review on Seaweeds and Seaweed-Derived Polysaccharides: Nutrition, Chemistry, Bioactivities, and Applications. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2023. Vol. 63, № 18. С. 2994–3015. DOI: 10.1080/10408398.2021.1969534

32. Zhou C., Yu X., Zhang Y., He R., Ma H. Chemically modified seaweed polysaccharides: Improved functional and biological properties and prospective in food applications. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2024. Vol. 23, № 4. Art. e13396. DOI: 10.1111/1541-4337.13396

33. Kim J. H., Lee H. A., Kang M. S., Park J. C., Lee S. H. Anti-phototoxicity and anti-melanogenesis activities of eelgrass Zostera marina and its phenolic constituents. Fitoterapia. 2024. Vol. 173. Art. 105785. DOI: 10.1016/j.fitote.2023.105785

34. Saha M., Goecke F., Bhadury P. Minireview: Algal natural compounds and extracts as antifoulants. Journal of Applied Phycology. 2021. Vol. 33, № 3. С. 1571–1581. DOI: 10.1007/s10811-021-02405-5

35. García-Vaquero M., Hayes M., O'Doherty J. V., Rajauria G. Seaweed proteins and applications in food and feed. Trends in Food Science & Technology. 2021. Vol. 104. С. 184–194. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.08.003

36. Kumar Y., Saxena A., Ramamurthy P. C., Voravuthikunchai S. P. Seaweed-based polysaccharides – Review of extraction, characterization, and bioplastic application. Green Chemistry. 2024. Vol. 26, № 5. С. 2728–2760. DOI: 10.1039/D3GC04375K

37. Alsenani F., Tupally K. R., Choi B. J., Zehravi M., Akter R., Ali F., Rahman M. H., Hanapi N. A., Ming L. C. Seaweed polysaccharides: Sources, structure and biomedical applications with special emphasis on antiviral potentials. Process Biochemistry. 2024. Vol. 143. С. 1–15. DOI: 10.1016/j.procbio.2024.04.031

38. Fourqurean J. W., Duarte C. M., Kennedy H., та ін. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. Nature Geoscience. 2012. Vol. 5, № 7. С. 505–509. DOI: 10.1038/ngeo1477

39. Shikov A. N., Pozharitskaya O. N., Makarov V. G., Kvetnaya A. S. Zostera marina L.: Supercritical CO_2-Extraction and Mass Spectrometric Characterization of Chemical Constituents Recovered from Seagrass. Frontiers in Marine Science. 2022. Vol. 9. Art. 182. DOI: 10.3389/fmars.2022.860273

40. Park J. S., Jung S. M., Lee D. Y., Kang B. J., Lee W. C. Heavy metal accumulation and phytoremediation potential by transplants of the seagrass Zostera marina in polluted bay systems. Marine Pollution Bulletin. 2019. Vol. 149. Art. 110650. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.110650

References

1. Ukrainian Scientific Centre of Ecology of the Sea (UkrSCES) (2022) State Monitoring Programme of the Black and Azov Seas. Kyiv: Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. Retrieved from: https://sea.gov.ua/?lang=en (accessed 11 September 2025).

2. Greenpeace (2024) Pressures, Threats and Impacts on Life in the Black Sea: Greenpeace Report. Retrieved from: https://www.greenpeace.org/static/planet4-romania-stateless/2024/05/5bacf577-02_pressures-threats-and-impacts-on-life-in-the-black-sea_greenpeace_rev02-1-1.pdf (accessed 11 September 2025).

3. Grignon-Dubois M., Rezzonico B. (2023) Phenolic chemistry of the seagrass Zostera marina Linnaeus: First assessment of geographic variability among populations on a broad spatial scale. *Phytochemistry*, vol. 213, art. 113788. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2023.113788

4. Uchida M., Miyoshi T., Kaneniwa M., Ishihara K., Nakashimada Y., Urano N. (2014) Production of 16.5 % v/v ethanol from seagrass seeds. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 118, no. 6, pp. 646–650. https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.05.017

5. Duarte C. M., Borum J., Short F. T., Walker D. I. (2008) Seagrass ecosystems: their global status and prospects. In: Polunin N. V. C. (ed.) *Aquatic Ecosystems: Trends and Global Prospects*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 281–294.

6. Rasmussen E. (1977) Seagrasses: Their uses, threats and management. *Aquatic Botany*, vol. 3, issue 4, pp. 297–308. https://doi.org/10.1016/0304-3770(77)90030-1

7. Bessonova V. P., Malyarenko O. S., Stonik V. A., Elyakov G. B. (2004) Zosterin – pectin from seagrass Zostera marina with gastroprotective effect. *Hydrobiological Journal*, vol. 40, no. 3, pp. 85–92. https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v40.i3.80

8. Bociag K., Stawicka A., Urbaniak M., et al. (2021) Phenolic chemistry of the seagrass Zostera marina: Geographic variability among populations. *Aquatic Botany*, vol. 171, art. 103393. https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2021.103393

9. Sævdal Dybsland C., Bekkby T., Hasle Enerstvedt K., Kvalheim O. M., Rinde E., Jordheim M. (2021) Variation in phenolic chemistry in Zostera marina seagrass along environmental gradients. *Plants*, vol. 10, no. 2, art. 334. https://doi.org/10.3390/plants10020334. Retrieved from: https://www.mdpi.com/2223-7747/10/2/334 (accessed 12 September 2025).

10. Li H., Zhu Y., Cao W., et al. (2019) Liquefaction of marine biomass into bio-polyols for polyurethane foams. *Cellulose*, vol. 26, pp. 4807–4819. https://doi.org/10.1007/s10570-019-02394-3

11. Choi J., Choi S., Kim Y., et al. (2018) Mechanical properties of seagrass fibers for composites. *BioResources*, vol. 13, no. 2, pp. 2820–2831. https://doi.org/10.15376/biores.13.2.2820-2831

12. Liu C., Guo R., Zhang Y., et al. (2019) Papermaking properties of seagrass fibers. *BioResources*, vol. 14, no. 2, pp. 2671–2684. https://doi.org/10.15376/biores.14.2.2671-2684

13. Fragassa C., Pavlovic A., Santulli C. (2025) Seagrass fibres as sustainable reinforcements for polymer-based composites: A review. *Polymers*, vol. 17, no. 3, art. 567. https://doi.org/10.3390/polym17030567

14. Crupi V., Majolino D., Fazio B., et al. (2023) Seagrass-based natural fibres: Potential applications in marine composites. *Marine Structures*, vol. 87, art. 103385. https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2023.103385

15. Fourqurean J. W., Manuel S. A., Kendrick G. A., et al. (2023) Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Frontiers in Marine Science*, vol. 10, art. 112233. https://doi.org/10.3389/fmars.2023.112233

16. Waycott M., Duarte C. M., Carruthers T. J. B., et al. (2023) Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Hydrobiologia*, vol. 887, pp. 1–19. https://doi.org/10.1007/s10750-023-05124-4

17. European Commission (2022) Blue Bioeconomy Report 2022. Luxembourg: Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2777/0186

18. Salvador J., et al. (2025) Blue growth and the role of seagrass biomass in sustainable bioeconomy. *Journal of Cleaner Production*, vol. 432, art. 139847. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.139847

19. Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy (2021) Natsionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Ukraini (2021) [National report on the state of the environment in Ukraine (2021)]. Kyiv : MZDPR. (in Ukrainian). Retrieved from: https://mepr.gov.ua (accessed 12 September 2025).

20. Davies P., Morvan C., Sire O., et al. (2007) Structure and properties of fibres from seagrass (Zostera marina). *Journal of Materials Science*, vol. 42, pp. 4850–4857. https://doi.org/10.1007/s10853-006-0546-1

21. Karaiumer A. Yu., Kustovska A. D. (2025) Vykorystannia voloknystykh vidkhodiv kompleksnoi pererobky vodorostevoi biomasy rodu Zostera dlia vyrobnytstva paperovykh materialiv [Use of fibrous waste from integrated processing of seaweed biomass of the genus Zostera for paper materials production]. *Naukoiemni tekhnolohii* [Science-Based Technologies], no. 2(66), pp. 278–287. (in Ukrainian).

22. Herrero M., Cifuentes A., Ibáñez E. (2006) Sub- and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: Plants, food-by-products, algae and microalgae: A review. *Food Chemistry*, vol. 98, no. 1, pp. 136–148. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.05.058

23. Guschina I. A., Harwood J. L. (2006) Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae. *Progress in Lipid Research*, vol. 45, pp. 160–186. https://doi.org/10.1016/j.plipres.2006.10.005

24. Uwineza P. A., Waśkiewicz A. (2020) Recent advances in supercritical fluid extraction of natural bioactive compounds from plant materials. *Molecules*, vol. 25, no. 17, art. 3847. https://doi.org/10.3390/molecules25173847. Retrieved from: https://www.mdpi.com/1420-3049/25/17/3847 (accessed 14 September 2025).

25. Holdt S. L., Kraan S. (2011) Bioactive compounds in seaweed: Functional food applications and legislation. *Journal of Applied Phycology*. https://doi.org/10.1007/s10811-010-9632-5

26. Shikov A. N., Pozharitskaya O. N., Makarov V. G., Kvetnaya A. S. (2022) Zostera marina L.: Supercritical CO_2-Extraction and Mass Spectrometric Characterization of Chemical Constituents Recovered from Seagrass. *Frontiers in Marine Science*, vol. 9, art. 182. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.860273

27. Park J. S., Jung S. M., Lee D. Y., Kang B. J., Lee W. C. (2019) Heavy metal accumulation and phytoremediation potential by transplants of the seagrass Zostera marina in polluted bay systems. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 149, art. 110650. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110650

28. Martins A., Vieira H., Gaspar H., Santos S. (2022) A comprehensive update on the bioactive compounds from seagrasses. *Marine Drugs*, vol. 20, no. 7, p. 456. https://doi.org/10.3390/md20070456

29. Lomartire S., Gonçalves A. M. M. (2022) Novel technologies for seaweed polysaccharides extraction and their use in food with therapeutically applications. *Foods*, vol. 11, no. 19, p. 3654. https://doi.org/10.3390/foods11193654

30. Balestri E., Vallerini F., Castelli A., Lardicci C. (2019) Use of bio-containers from seagrass wrack with nursery planting to improve the eco-sustainability of coastal habitat restoration. *Journal of Environmental Management*, vol. 251, art. 109594. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109594

31. Torres M. D., Kraan S., Domínguez H. (2023) A review on seaweeds and seaweed-derived polysaccharides: Nutrition, chemistry, bioactivities, and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 63, no. 18, pp. 2994–3015. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1969534

32. Zhou C., Yu X., Zhang Y., He R., Ma H. (2024) Chemically modified seaweed polysaccharides: Improved functional and biological properties and prospective in food applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 23, no. 4, art. e13396. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13396

33. Kim J. H., Lee H. A., Kang M. S., Park J. C., Lee S.H. (2024) Anti-phototoxicity and anti-melanogenesis activities of eelgrass Zostera marina and its phenolic constituents. *Fitoterapia*, vol. 173, art. 105785. https://doi.org/10.1016/j.fitote.2023.105785

34. Saha M., Goecke F., Bhadury P. (2021) Minireview: Algal natural compounds and extracts as antifoulants. *Journal of Applied Phycology*, vol. 33, no. 3, pp. 1571–1581. https://doi.org/10.1007/s10811-021-02405-5

35. García-Vaquero M., Hayes M., O'Doherty J.V., Rajauria G. (2021) Seaweed proteins and applications in food and feed. *Trends in Food Science & Technology*, vol. 104, pp. 184–194. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.003

36. Kumar Y., Saxena A., Ramamurthy P.C., Voravuthikunchai S.P. (2024) Seaweed-based polysaccharides – Review of extraction, characterization, and bioplastic application. *Green Chemistry*, vol. 26, no. 5, pp. 2728–2760. https://doi.org/10.1039/D3GC04375K

37. Alsenani F., Tupally K. R., Choi B. J., Zehravi M., Akter R., Ali F., Rahman M. H., Hanapi N. A., Ming L. C. (2024) Seaweed polysaccharides: Sources, structure and biomedical applications with special emphasis on antiviral potentials. *Process Biochemistry*, vol. 143, pp. 1–15. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2024.04.031

38. Fourqurean J. W., Duarte C. M., Kennedy H., et al. (2012) Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nature Geoscience*, vol. 5, no. 7, pp. 505–509. https://doi.org/10.1038/ngeo1477

39. Shikov A. N., Pozharitskaya O. N., Makarov V. G., Kvetnaya A. S. (2022) Zostera marina L.: Supercritical CO_2-Extraction and Mass Spectrometric Characterization of Chemical Constituents Recovered from Seagrass. *Frontiers in Marine Science*, vol. 9, art. 182. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.860273

40. Park J. S., Jung S. M., Lee D. Y., Kang B. J., Lee W. C. (2019) Heavy metal accumulation and phytoremediation potential by transplants of the seagrass Zostera marina in polluted bay systems. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 149, art. 110650. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110650

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 16.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 539.375.5:621.793.74 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.17

В. І. КОПИЛОВ
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри зварювального виробництва
Інститут матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-1789-3226

В. В. ПЕТРЕНКО
аспірант кафедри зварювального виробництва
Інститут матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

І. А. СЄЛІВЕРСТОВ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0009-6135-8165

АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЗАТРАТ ПРИ ФОРМУВАННІ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ І ПРИ РУЙНУВАННІ В УМОВАХ ДІЇ НАВАНТАЖЕНЬ

Для оцінки енергії адгезії взаємодіючих поверхонь при плазмовому напиленні порошкових матеріалів у системі «основа – плазмове покриття», запропоновані підходи перш за все, термодинамічний і електронно-статистичний. Був проведений аналіз поверхневих властивостей і оцінку процесів утворення міцних зв'язків і їх руйнування в умовах плазмового напилення із залученням розрахунково-експериментальних методів досліджень, отримані рішення, в загальному випадку, дозволили провести розрахунки значень енергії і сили адгезії, а також міцності зчеплення покриттів з основою.

Розраховані п значення роботи адгезії U_a на основі фізичної моделі, яка враховує такі параметри напилення, як швидкість газового потоку, швидкість і розмір частинок, враховує співвідношення геометричних параметрів напилюваних частинок і мікрорельєфу поверхневих шарів основного матеріалу, їх фізико-механічні властивості. від параметрів частинок напилюваного матеріалу

Представлена методика оцінки характеру руйнування та тріщиностійкості отриманих композитних матеріалів на базі розгляду енергетичного балансу системив момент виникнення тріщини. Метою досліджень в цьому напрямку є визначення коефіцієнтів тріщиностійкості K_{1c}, інтенсивності вивільненої енергії G_{1c} при розгляді балансу енергій у момент виникнення тріщини у різних ділянках системи основа-покриття. Шляхом введення до розрахунку критеріальних залежностей надається можливість прогнозування характеру руйнування системи на основі співвідношень коефіцієнтів тріщиностійкості K_{1c} та деяких безрозмірних параметрів, що описують в сукупності розтріскування, відшарування, а також деформаційні процеси.

Досліджені покриття в роботі показали високі значення в'язкості руйнування (G_{1c} та K_{1c}). Встановлено, що системи з ультрадисперсними наночастинками відзначаються підвищеною тріщиностійкістю. Наночастинки в багатофазному покритті сприяють утворенню міцних когезійних і адгезійних зв'язків як у самому покритті, так і в міжфазній області.

Ключові слова: *плазмове напилення, адгезія, енергетичний баланс, руйнування, тріщиностійкість.*

© Копилов В. І., Петренко В. В., Сєліверстов І. А., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

V. I. KOPYLOV
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Welding Production
E. O. Paton Institute of Materials Science and Welding
of National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-1789-3226

V. V. PETRENKO
Postgraduate Student at the Department of Welding Production
E. O. Paton Institute of Materials Science and Welding
of National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

I. A. SIELIVERSTOV
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation,
Robotics, and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0009-6135-8165

ANALYSIS OF ENERGY COSTS IN THE FORMATION OF PLASMA COATINGS AND IN DESTRUCTION UNDER LOAD CONDITIONS

To evaluate the adhesion energy of interacting surfaces during plasma spraying of powder materials in the 'base – plasma coating' system, the proposed approaches are primarily thermodynamic and electron-statistical. An analysis of surface properties and an assessment of the processes of formation of strong bonds and their destruction under plasma spraying conditions were carried out using computational and experimental research methods. The solutions obtained, in general, made it possible to calculate the values of adhesion energy and force, as well as the strength of the bond between the coatings and the base.

The calculated values of adhesion work U_a were calculated based on a physical model that takes into account such sputtering parameters as gas flow velocity, particle velocity and size, the ratio of the geometric parameters of the sputtered particles and the micro-relief of the surface layers of the base material, and their physical and mechanical properties. from the parameters of the sprayed material particles

The presented methodology for assessing the nature of destruction and crack resistance of the obtained composite materials is based on consideration of the energy balance of the system at the moment of crack initiation. The aim of research in this area is to determine the crack resistance coefficients K_{1c} and the intensity of released energy G_{1c} when considering the energy balance at the moment of crack formation in different areas of the base-coating system. By introducing criterion dependencies into the calculation, it is possible to predict the nature of system failure based on the ratios of crack resistance coefficients K_{1c} and certain dimensionless parameters that collectively describe cracking, delamination, and deformation processes.

The coatings studied in the work showed high values of fracture toughness (G_{1c} and K_{1c}). It has been established that systems with ultradisperse nanoparticles are characterised by increased crack resistance. Nanoparticles in a multiphase coating contribute to the formation of strong cohesive and adhesive bonds both in the coating itself and in the interphase region.

Key words: *plasma spraying, adhesion, energy balance, destruction, crack resistance.*

Постановка проблеми

Питання вдосконалення технології створення високоміцних та високотемпературних багатофазових плазмових покриттів на основі сумішей керамічних та металевих матеріалів, в тому числі і наноматеріалів, відносяться до основних напрямів розвитку сучасного матеріалознавства [1–3]. Подальше напилення подібної порошкової суміші приводить до утворення структур покриттів з нанорозмірними складовими, певним чином розподілених по об'єму, що забезпечує набуття нових властивостей композицій для роботи в умовах дії температурих полів, напруги, агресивних газових і рідких середовищ [1, 4]. Внаслідок процесів, що при цьому протікають, формується система «основа – покриття», фізико-механічні характеристики якої, насамперед, когезійна і адгезійна міцність, модуль пружності визначаються структурою, фазовим і хімічним складом отриманого покриття, що є багатошаровою композицією у вигляді хаотично розподілених і пов'язаних між собою розплюснутих частинок – ламелів [5–7].

Розроблюються підходи до конструювання структури матеріалу покриттів, коли приходиться враховувати наявність тріщин, що виникають при нанесенні покриттів, та, що розвиваються при експлуатації композиційного матеріалу. Формування структури крихкого порошкового матеріалу, у тому числі напиленого покриття, необхідно розглядати з позиції гальмування розвитку тріщини, тобто приходиться враховувати той факт, що вона повинна бути такою, щоб забезпечити високу напругу старту тріщини та утруднити подальше поширення. Важливим

параметром, що визначає експлуатаційні властивості композитного матеріалу, характер руйнування є його тріщиностійкість (в'язкість руйнування) та інтенсивність вивільненої при цьому енергії [4, 8].

В свою чергу процеси, що супроводжують встановлення міцних зв'язків при формуванні покриттів, а також і при їх руйнуванні, залежатимуть від напруженого і енергетичного стану отриманої композиції. Як при утворенні з'єднання, так і при руйнуванні покриттів відбувається зміна вільної поверхні та поверхневої енергії контактної системи «основа – покриття». Створюється активований стан у певному об'ємі утвореної композиції, що оцінюється, в тому числі, відповідними енергетичними витратами. З однієї сторони, утворення з'єднання є результатом контактування поверхонь за певних умов та параметрів (навантаження, температура, час). При цьому відбувається зменшення вільної поверхні та поверхневої енергії контактної системи. З іншого боку, процес руйнування є розділенням матеріалу, в нашому випадку системи «основа – покриття», на частини, що призводить до збільшення вільної поверхні і поверхневої енергії композиції. Назагал, можна констатувати, що формування і руйнування покриттів можна зіставити з точки зору енергетичних затрат на ці обидва процеси.

Функціональні властивості покриттів, що утворюються, в процесі напилення і подальшої термообробки залежатимуть не тільки від сформованої структури, фазового і хімічного складу даного покриття, але також і від стану контактної зони, її міжфазної міцності. Процеси, що протікають безпосередньо при ударі частинок о поверхню, зумовлюють формування певної площі контакту [8–10], і відповідний цій площі рівень міцності зчеплення, а також фізико-механічні характеристики системи «основа – покриття», в тому числі такої важливої характеристики покриття, як його тріщиностійкість. Адгезійні та міцнісні властивості є найбільш важливими характеристиками покриття, а також міжфазної контактної зони, і вони визначаються, перш за все, параметрами частинок, що напилюються.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи було опробування методики оцінки адгезійно-когезійних властивостей системи «основа – плазмове покриття», а також оцінки характеру руйнування та тріщиностійкості багатофазного плазмового покриття за умов випробування композиції на вигин на базі розгляду енергетичного балансу в момент виникнення тріщини, розтріскування та відшарування.

Викладення основного матеріалу дослідження

У роботі проводився аналіз тріщиностійкості та характеру руйнування матеріалів із плазмовими багатофазними покриттями різного складу та структури на основі сумішей порошкових матеріалів [1, 11]. Для визначення фізико-механічних характеристик, в тому числі, тріщиностійкості, на розтяг і згин системи «основа-покриття» запропоновані, як розрахункові, так і експериментальні методи досліджень [1, 2, 4].

Адгезійні властивості плазмових покриттів

Аналіз поверхневих властивостей і оцінка процесів утворення міцних зв'язків і їх руйнування в умовах плазмового напилення здійснюється із залученням розрахунково-експериментальних методів досліджень, і, як правило, ведеться у двох напрямках, заснованих або на термодинамічних рішеннях, або на розрахунках електронного розподілу поблизу поверхні та розрахунку на цій основі поверхневої енергії [12–14]. Простіші рішення для оцінки адгезійних характеристик отримані при використанні термодинамічних підходів [10, 13].

В результаті взаємодії двох компонентів (А і В), що контактують при ударній взаємодії, виникає адгезія покриття до твердого тіла, термодинамічною мірою якої є питома робота адгезії [1, 12]

$$W_{ad} = \sigma_A + \sigma_B - E_{мжф}, \tag{1}$$

де σ_A, σ_B – поверхневі енергії розділених контактуючих тіл (металів); $E_{мхф}$ – міжфазна поверхнева енергія, рівна роботі утворення одиниці поверхні розділу при контакті тіл.

Поверхнева міжфазна енергія, яка є наслідком протікання термодинамічної реакції і створення нової системи, згідно підходам В.Н. Єрьоменка і Ю.В. Найдіча запишеться у вигляді [12, 13]

$$E_{мжф} = \sigma_{Me'O} + \sigma_{Me'} + \Delta Z, \tag{2}$$

де $W_{ad} = -\Delta Z$ величина повної роботи реакції є роботою адгезії.

За значеннями роботи адгезії в подальшому можна оцінити міцність зчеплення покриття з основою.

Найбільш точне рішення для оцінки міжфазної енергії (адгезійних властивостей) двох тіл, розділених зазором, можна отримати на основі електронно-статистичної теорії із залученням квантовомеханічних методів (метод функціоналу щільності – МФЩ).

Проте, для багатьох систем металів, коли йдеться, у тому числі, про напилення кераміки, основні труднощі при знаходженні міцності зчеплення покриття з використанням електронно-статистичного підходу і методу функціонала щільності обумовлені труднощами визначення в рівнянні (2) міжфазної енергії $E_{мжф}(D)$. Енергія (робота) адгезії системи двох металів, розділених проміжком D, є надлишковою частиною поверхневої енергії цієї системи при видаленні тіл в нескінченність, і дорівнює роботі, яку необхідно витратити при збільшенні відстані між поверхнями від D до ∞ [1]. Для системи покриття - матриця межу розділу представимо у вигляді контакту двох поверхонь, що характеризуються нерівностями у вигляді сходинок дислокацій з кутом орієнтації

щодо геометричної площини розділу α, середньою висотою h_α і довжиною L_α. З урахуванням того, що взаємодія фаз відбувається на окремих ділянках – активних центрах, структуру границі контакту описуватимемо функцією розподілу $\Phi(\alpha)$, причому кількість активних центрів, орієнтованих у сегменті α, $\alpha + d\alpha$ відповідно дорівнює $\Phi(\alpha)$ $d\alpha$ [1, 12]. Енергію адгезії для одного активного центра можна представити у вигляді рівняння:

$$E_{ad}(D, \alpha) = E_{AB}(+\infty) - E_{межф}(D, \alpha). \quad (3)$$

У рівнянні (3) перший доданок $E_{AB}(+\infty) = (\sigma_A + \sigma_B)h_\alpha L_\alpha$ – енергія вільних, не взаємодіючих поверхонь, орієнтованих під кутом α і нескінченно віддалених металів в області одного активного центру. Другий доданок є енергією системи основа-покриття, що має у вихідному стані зазор D_0, яка еквівалентна енергії видалення покриття від основи шляхом зсуву в площині одного центру і зміщення уздовж нормалі до нього [1, 12]. Якщо розглядати видалення покриття від основи вздовж осі як зсув в площині одного активного центру і зміщення уздовж нормалі до нього, то енергія системи основа - покриття, що має у вихідному стані зазор D_0, дорівнює

$$E_{\alpha d}(D) = E_{AB}(+\infty)L_\alpha[h_\alpha - (h_\alpha - D\sin\alpha)] \cdot \theta(x) + \sigma_{межф}(d)L_\alpha(h_\alpha - D\sin\alpha)\theta(x). \quad (4)$$

У виразі (4) $\sigma_{межф}(d)$ є міжфазна енергія одиниці площі границі розділу, що визначається за методом функціоналу щільності, який полягає у вирішенні варіаційної задачі про знаходження мінімуму енергії вільних електронів у полі зовнішнього потенціалу. При цьому взаємодіючі фази розташовуються на відстані $d = D_0 + D\cos\alpha$; D_0 – відповідає мінімуму вільної енергії. У рівнянні (4) $\theta(x) = 0$ при $x < 0$, та $\theta(x) = 1$ при $x > 0$, $(x = h_\alpha - D\sin\alpha)$ – ступінчаста функція Хевісайда [1, 15]. Повна енергія адгезії усієї зони контакту залежно від величини зазору між контактуючими металами, з врахуванням функції розподілу $\Phi(\alpha)$ і параметрів активних центрів, які визначаються структурою поверхонь, обумовленою фізико-хімічними процесами при плазмовому напиленні, описується виразом:

$$E_{ad}(D) = h_0 L \int_0^{\pi/2} \left[\sigma_A + \sigma_B - \sigma_{AB}\left(D\cos\alpha + D_0\right)\right]\cos\alpha\left(1 - \frac{D}{h_0}\sin\alpha\right)\theta\left(1 - \frac{D\sin\alpha}{h_0}\right)d\alpha. \quad (5)$$

Визначивши міжфазну енергію, надалі за рівнянням (5) розраховується енергія адгезії. Знаючи енергію адгезії, як функцію відстані між контактуючими поверхнями, можна визначити їх силу взаємодії у вигляді:

$$P_{ad}(D) = -\partial E_{ad}(D) \Big/ \partial D. \quad (6)$$

Вирішуючи рівняння (6) отримаємо вираз для питомої міцності зчеплення по фізичній площі контакту S_d у вигляді

$$\sigma_{зч} = P_{ad}(D) \Big/ S_d, \quad E_{ad} = \int_0^D P_{ad}(D)dD \approx P(D)_{\max} D, \quad (7)$$

де S_d – фактична площа контакту; E_{ad}, P_{ad} – робота і сила адгезії покриттів з розрахунку на одиницю площі контакту між покриттям і твердим тілом; D – відстань дії міжатомних зв'язків (зазор між контактуючими поверхнями).

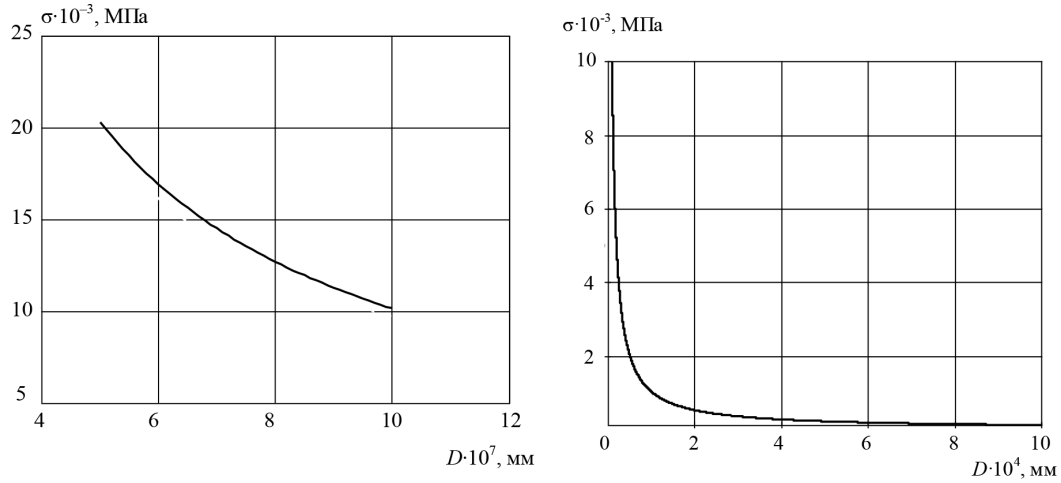
Отримані рішення, в загальному випадку, дозволяють провести розрахунки значень енергії і сили адгезії, а також міцності зчеплення покриттів з основою стосовно плазмового напилення. На рис. 1 приведені розрахунки міцності зчеплення залежно від дистанції зближення (D) двох контактуючих поверхонь на прикладі системи Fe (основа) – Mo (покриття) при плазмовому напиленні, при температурі в контакті $T = 1400$ K [1, 13].

На рис. 2 представлені результати розрахунків роботи (енергії) адгезії з врахуванням температури в контакті стосовно конкретних систем (основа – покриття).

Роль фізичної площі контакту при плазмовому напиленні у встановленні міжфазної міцності

У загальній постановці можна вважати, що процес утворення з'єднання при ударній взаємодії частинок покриття пов'язаний з розривом або дисоціацією хімічних зв'язків атомів поверхні твердого тіла, коли здійснюється перегрупування атомів твердого тіла і встановлюється енергетично найбільш вигідний далекий і ближній порядок. В процесі високотемпературної і високошвидкісної ударної взаємодії здійснюється термо-деформаційна активація і перехід групи атомів в активований стан за рахунок внутрішньої енергії коливань атомів в твердому тілі. Міцні зв'язкі реалізуються і локалізуються на поверхні площиною (F_ϕ), в місцях з найбільшою енергією. Площа фізичного контакту (F_ϕ), по якій можна розрахувати міцність зчеплення всього покриття і основи, оцінена на підставі моделі ударної взаємодії частинок напилюваного матеріалу з поверхнею твердого тіла [1, 10]. Фізична модель враховує такі параметри напилення, як швидкість газового потоку, швидкість і розмір частинок, враховує співвідношення геометричних параметрів напилюваних частинок і мікрорельєфу поверхневих шарів основного матеріалу, їх фізико-механічні властивості. За площею контакту F_ϕ, енергією одиничного зв'язку між атомами E_a і числом атомних зв'язків на цій площі N_a можна розрахувати роботу адгезії, і, відповідно, міцність зчеплення покриття до основи [1, 13]:

$$U_a = E_a N_0 \bar{F}_\Phi \left\{1 - \exp\left[-\nu\left(t - t_0\right)\exp\left(-\frac{U_{ac}}{kT_K}\right)\right]\right\}, \quad (8)$$



(а) (б)

Рис. 1. Зміна міцності зчеплення плазмового покриття з основою в залежності від дистанції зближення взаємодіючих поверхонь в умовах ідеального (а) та звичайного (б) контактів (на прикладі молібденових частинок)

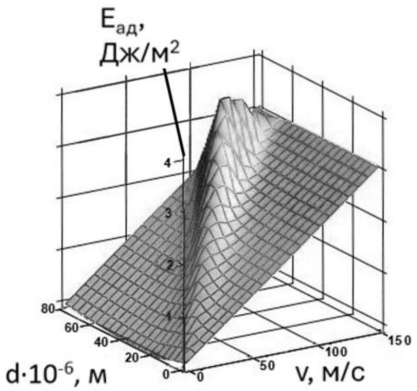


Рис. 2. Значення енергії адгезії залежно від швидкості та діаметра молібденових частинок в контакті для системи плазмове покриття – основа

де $\overline{F}_{\Phi} = F_{\phi}/F_{H}$ відносна площа фізичного контакту, відношення фізичної (фактичної) площі до номінальної (максимальної) площі.

На рис. 3 приведені значення роботи адгезії U_a від параметрів частинок напилюваного матеріалу [1, 9].

На рис. 3 крива 1 (верхня) відноситься до молібденових частинок, що знаходяться в розплавленому (передплавильному) стані, а крива 2 (нижча) – відповідно до частинок у пластичному стані, тобто при нижчих температурах,

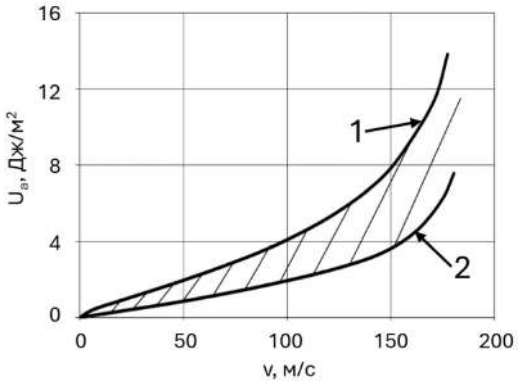


Рис. 3. Зміна роботи адгезії U_a залежно від швидкості частинок; зашрихована зона характеризує ступінь пластичності

інакше кажучи заштрихована область характеризує ступінь пластичності матеріалу покриття. Розрахунки проведені для відповідних значень енергії зв'язку атомів в основі E_a = 414 кДж/моль і значення енергії активації процесу утворення з'єднання $U_{ac} \approx$ 160кДж/моль, знайдених в рамках кінетичної теорії міцності твердих тіл. У момент схоплювання частинок з основою відбувається локальне підвищення активності поверхні твердого тіла під впливом ударного тиску частинок, а також навантаження міжатомних зв'язків та зниження активаційного бар'єру. Далі здійснюється теплова активація, тобто перехід групи атомів до активованого стану за рахунок внутрішньої енергії коливань атомів у твердому тілі.

Формування контакту безпосередньо між частинками, що напилюються (когезійна міцність), і між частинками і основою (міжфазна міцність)

В умовах нанесення покриття, а також впливу зовнішніх факторів можливе зародження та розповсюдження тріщин, що супроводжується розтріскуванням або відшаруванням покриття. При цьому механізм і характер такого руйнування залежать від умов розвитку мікротріщин по межах між зернами (частинками), як усередині самого покриття, так і на межі покриття з основою [1, 8, 12]. Поверхневі фізичні процеси, що протікають, як при створенні з'єднання, так і при його руйнування, внаслідок дефектності кристалічної структури, енергетичної неоднорідності поверхні твердого тіла приводять до ситуації, коли хімічна взаємодія відбувається та локалізується у місцях з найбільшою енергією. Саме в цих зонах виникають осередки схоплювання та процес з'єднання виявляється дискретним. Така міжфазна зона у вигляді дискретного контакту покриття з поверхнею твердого тіла при випробуванні на розрив може бути представлена моделлю матеріалу, ослабленого тріщинами в його об'ємі [1, 4].

Згідно з моделлю, з однієї сторони, розглядається дискретний контакт плазмового покриття з основою, який подається у вигляді окремих плям контакту ламелів (диаметром d) з поверхнею основи. З іншої сторони, така модель стосується також контакту частинок покриття між собою. В цих обох випадках для руйнування окремої плями контакту між частинками, а також між частинкою та основою необхідне навантаження оцінюється виразом [1, 4, 7]:

$$p = d\sqrt{d}K_{1C}(1 - f(z)); \quad K_{1C} = \sqrt{\frac{2\pi E\gamma_{еф}}{(1-\nu^2)}}. \tag{9}$$

У рівнянні (9) функція $f(z) = 0{,}339z^2 + 0{,}136z^5$, у нашому випадку $f(z) \ll 1$; $\gamma_{еф}$ – питома (ефективна) робота руйнування; E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона; h – відстань між плямами контакту радіуса a; $z = 2a/h$; K_{1c} – коефіцієнт інтенсивності напруги.

Визначивши площу фактичного контакту покриття з основою і необхідне навантаження для його руйнування p, можна оцінити міцність зчеплення покриття з основою. У процесі формування багатошарового плазмового покриття міцний зв'язок реалізується не на всій площі фізичного контакту $f_ф$ між атомами деформованих частинок, а тільки на деякій її частині f_d, що складається з певної кількості активних центрів. Остаточний вираз для навантаження, необхідного для руйнування окремої плями контакту набуде вигляду:

$$p = d \cdot \sqrt{\pi \cdot d \cdot (1-\nu^2)^{-1} \cdot \overline{f}_{\Phi}^{d} \cdot E \cdot \gamma_{мф}}. \tag{10}$$

На рис. 4 представлена залежність розривного навантаження p від відносної площі при руйнуванні одиночного контакту $\overline{f}_{ф}^{d} = F_ф / F_н = f_d / f_ф$ частинок металевого термоактиваційного порошку NiAl, його суміші із порошком аеросилом ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$), а також суміші металевого порошку NiCr із аеросилом ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$). Аеросил ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) це нанопорошковий матеріал, отриманий за спеціальною технологією [1, 12].

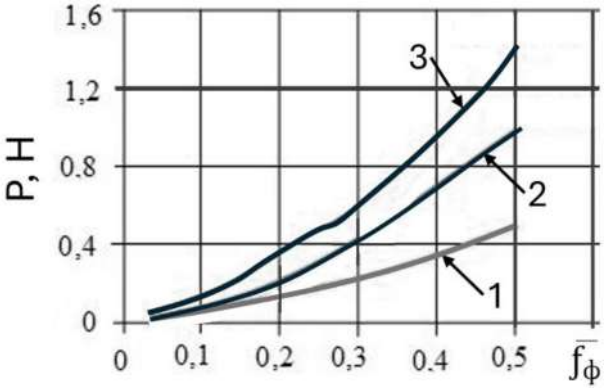


Рис. 4. Залежність зусилля, необхідного для руйнування одиничної плями контакту від відносної площі контакту двох частинок (ламелей) з порошку: 1 – NiAl; 2 – NiAl – ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$); 3 – NiCr – ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$)

Моделювання руйнування покриття та міжфазної зони

Нанесення покриття в більшості випадків спрямоване на зміцнення композиційного матеріалу, але, в той же час, процес напилення пов'язаний з підвищенням дефектності поверхневих шарів, і може також призвести до руйнування.

Характеристикою опору руйнування матеріалів служить коефіцієнт інтенсивності напруги K_{1c}, пов'язаний в свою чергу з роботою, яку необхідно виконати для ініціювання поширення тріщини G_{1c}, інтенсивності вивільненої енергії. Поряд з критичними параметрами K_{1c} і G_{1c} ініціювання тріщин визначається інтегральною характеристикою – питомою ефективною роботою руйнування $\gamma_{еф}$, за допомогою якої можна регулювати кінетику руйнування. За цих умов діють основні залежності [1, 7, 8, 14]:

$$K_{1C}=\sqrt{\frac{2\pi E\gamma_{эф}}{(1-\nu^2)}},\quad G_{1C}=\frac{(1-\nu^2)K_{1C}}{E},\quad K_{1C}=\lambda\left(G_{1C}E\right)^{1/2},\quad G_{1C}=2\gamma_{1c}, \tag{11}$$

де ν – коефіцієнт Пуассона; E – модуль пружності; λ – постійна, яка залежить від коефіцієнта Пуассона.

При розрахунку енергії, запасеної в системі «основа-покриття» ΔU, в момент виникнення тріщини в покритті враховується робота, виконана прикладеною силою, робота розсіювання, пов'язане з пластичною деформацією поверхневих шарів основи, зміна міжфазної енергії та енергія деформації, яка звільняється при розвитку тріщини [1, 8, 14]:

$$\Delta U=\Phi(\Delta W,\Delta W_d,\Delta U_s,\Delta U_e. \tag{12}$$

Метою досліджень в цьому напрямку є визначення коефіцієнтів тріщиностійкості K_{1c}, інтенсивності вивільненої енергії G_{1c} при розгляді балансу енергій у момент виникнення тріщини у різних ділянках системи основа-покриття. Шляхом введення до розрахунку критеріальних залежностей надається можливість прогнозування характеру руйнування системи на основі співвідношень коефіцієнтів тріщиностійкості K_{1c} та деяких безрозмірних параметрів, що описують в сукупності розтріскування, відшарування, а також деформаційні процеси, які проходять при цьому Інтенсивність вивільненої енергії системи при розтріскуванні дорівнює відношенню витраченої на цей процес енергії до товщини покриття [1, 8, 14]:

$$G=\Delta U/h=G=-\frac{\sigma^2 h}{E_n}\left[\frac{\sigma}{3\tau}+\pi F\left(\Sigma\right)\right]. \tag{13}$$

У рівнянні (13) σ – сумарна напруга в покритті (з врахуванням залишкової); $F(\Sigma)$ – табульована функція, залежна від відношення модулів пружності покриття та основи $\Sigma=E_n/E_o$; h – товщина покриття.

Результати розрахунків, згідно рівнянню (12), представлені на рис. 5, де показано розподіл складових енергії системи «сталь 20 – суміш ZrO_2-NiCr», залежно від прикладеної напруги,

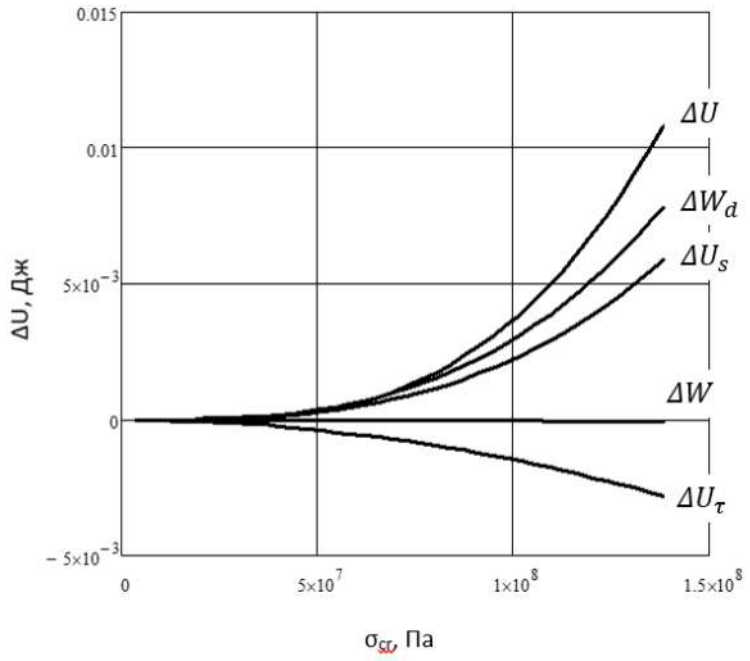


Рис. 5. Енергетичний баланс, згідно рівнянню (12), у системі «основа – покриття», залежно від прикладеної напруги, покриття (ZrO_2-NiCr)

При розгляді фізичної моделі взаємодії і фактичної площі контакту необхідно враховувати основні параметри і фізико-механічні характеристики, як елементів покриття (швидкість і дисперсність частинок), так і поверхневих шарів, такі як структуру, дислокаційну будову, параметри грат, температуру в контакті, міцність міжатомних зв'язків. що у свою чергу впливає на адгезійні і когезійні властивості покриття.

Для міжфазної тріщини (відшарування) отримуємо ріщення:

$$K_{1C} = \left[\left(\overline{F}_{\phi} \right)^2 \frac{(\sigma_b^{осн})^2 \cdot d(1-\nu^2)}{8\pi} \sigma_n \right]^{1/2} \text{ та } \gamma_{мф} = (\overline{F}_{\phi})^2 \frac{(\sigma_в^{осн})^2 \cdot d}{E_o} \left(\frac{1-\nu^2}{16\pi} \right). \quad (14)$$

На рис. 6 представлена функціональна залежність різних параметрів (швидкість, дисперсність частинок, площа фізичного контакту), що характеризують процес напилення покриття, з одного боку, і адгезійно-когезійні властивості ($\Delta G_{мф}$, ΔG_n) при навантаженні композиційного матеріалу до моменту руйнування покриття, з іншого боку.

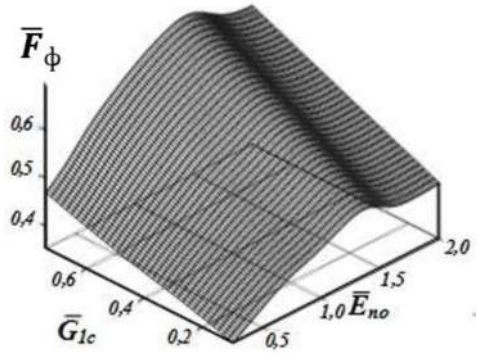


Рис. 6. Співвідношення інтенсивності вивільненої енергії при утворенні міжфазної тріщини та при розтріскуванні покриття $\overline{G}_{1c} = \Delta G_{мф} / \Delta G_n$ залежно від відносної площі контакту $\overline{F}_{\phi}$ та відношення модулів пружності покриття/основа $\overline{E}_{no}$

На рис. 7 представлені результати розрахунків енергетичних параметрів систем (*G* та *U*) від параметрів напилення і властивостей сформованого покриття.

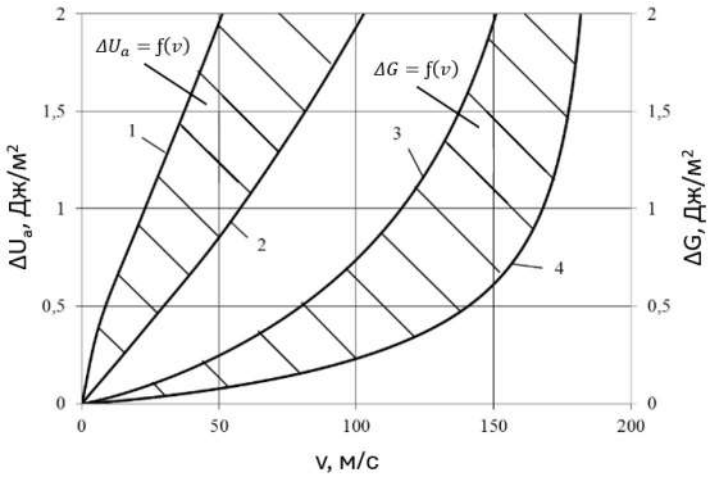


Рис. 7. Енергетичні характеристики системи «основа – покриття» в залежності від параметрів напилення: залежність роботи адгезії ΔU_a (заштрихована зона між кривими 1–2) і залежність вивільненої енергії при руйнуванні міжфазної зони ΔG (область між кривими 3–4) від швидкості частинок *v*

Маючи у своєму розпорядженні теоретичні або експериментальні дані про швидкість і діаметр частинок, що напиляються, відносної площі фізичного контакту або міцності зчеплення таких частинок (ламелів, сплетів) до основи, можна оцінити тріщиностійкість даного покриття. Під впливом навантаження для покриттів різного складу характерний різний режим руйнування – адгезійне чи когезійне. У деяких випадках когезійна руйнація може супроводжуватися розривом адгезійних зв'язків. Результати обробки експериментальних даних за рівнянням (14) представлені на рис. 8 та рис. 9.

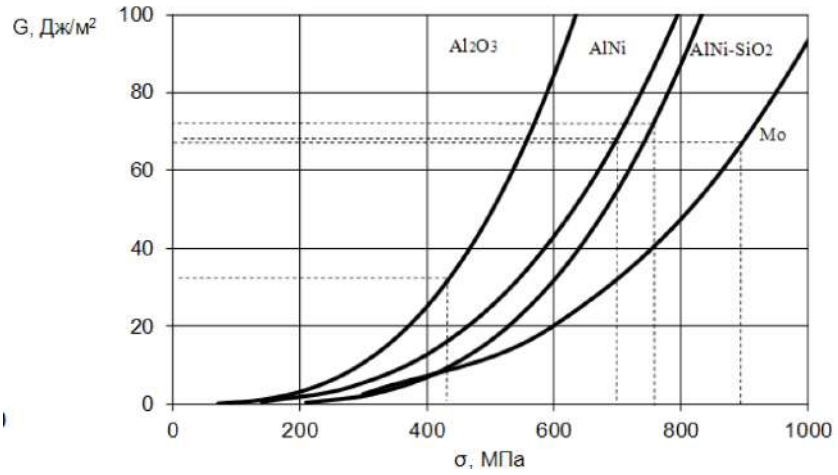


Рис. 8. Залежність вивільненої енергії в момент виникнення тріщини для різних систем покриттів від напруги в покритті

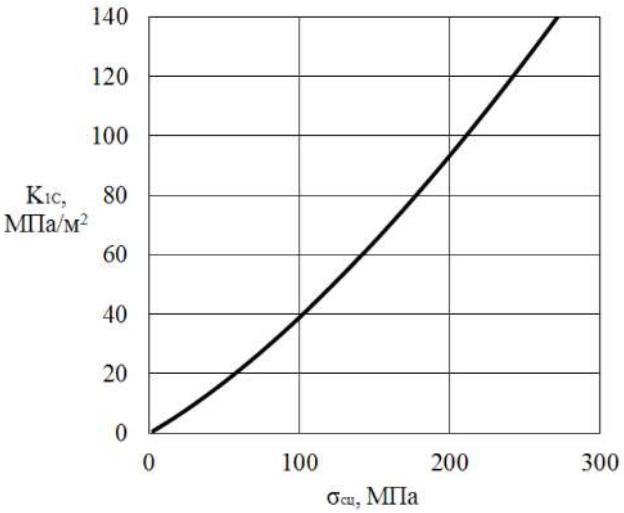


Рис. 9. Залежність тріщиностійкості та міцності зчеплення плазмових покриттів

На рис. 8 штриховими лініями показані критичні значення параметрів, а на рис. 9 продемонстровано взаємозв'язок міцності зчеплення від коефіцієнта тріщиностійкості, яка пов'язує когезійні та адгезійні властивості напилених покриттів.

Таблиця 1

Параметри тріщиностійкості та напружень в покритті в системі «основа – покриття» за випробуваннями на згин для плазмових покриттів

№	Матеріал суміші для покриттів	σ_{cr}, ИПа	G, Дж/м²	K_{1c}, МПа · м$^{1/2}$
1	Mo	136	100,28	3,32
2	NiAl	236	263,94	6,44
3	Al_2O_3	46	16,6	1,2
4	NiAl-Al_2O_3	80	42,36	1,84
5	NiAl-Alal	436	985,01	12,42
6	NiCr-Alal	536	2029,00	18,93
7	NiCr-ZrO_2, (1:1) без штучної тріщини	86,32	505	2,51
8	NiCr-ZrO_2, (1:1), із однією тріщиною	74,93	357	2,11
9	NiCr-ZrO_2 (1:1), з двома тріщинами	59,19	202	1,59
10	NiAl-ZrO_2 (1:1)	69,40	336	2,09

Примітка: Alal – це нанопорошковий матеріал складу $Al_2O_3 \cdot SiO_2$

В умовах багатофазної структури плазмового покриття характер зародження та розвитку мікротріщин обумовлюється нерівноважним станом границь між окремими розплющеними частинками, рівнем їх взаємодії в зоні контакту, співвідношенням модулів пружності різних кристалітів у покритті.

Отримані експериментально-теоретичні дані дають можливість описати взаємозв'язок параметрів напилення з характеристиками тріщиностійкості системи (K_{1c}, ΔG). Зі збільшенням щільності покриття та з наближенням його модуля пружності до пружних характеристик основного матеріалу збільшується стійкість до руйнування.

Розрахунково-експериментальні дані для низки покриттів та систем в результаті випробувань на вигин, у тому числі і за наявності штучно наведених тріщин, концентраторів напруги, (що робиться для порівняння), представлені у таблиці 1.

Висновки

Досліджені в роботі покриття продемонстрували досить високі показники в'язкості руйнування (G_{1c} і K_{1c}). З отриманих даних випливає, що системи з ультрадисперсними складовими мають більш високі показники тріщиностійкості. Дані результати пояснюються наявністю у порошкової суміші дисперсної наноскладової у вигляді аеросилу (SiO_2) при відповідній технології плазмового напилення. Наявність наноскладових у багатофазному покритті сприяє формуванню міцних когезійних та адгезійних зв'язків усередині покриття та міжфазній зоні.

Список використаної літератури

1. Копилов В. І., Смирнов І. В., Сєліверстов І. А. Формування та властивості плазмових багатофазних покриттів із нанорозмірними складовими : монографія. Київ : Наукова думка, 2019. 480 с.

2. Kopylov V. I. Effect of multiphase structure of plasma coatings on their elastic and strength properties. *Eastern-Eurohean Journal of Enterprise Technologies*. 2016. №5/5 (83). P. 49–57. DOI:10.15587/1729-4061.2016.79586

3. Розов Ю. Г., Сєліверстов І. А., Сошко В. О. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів : навч. посіб. Херсон : Олді-плюс, 2010. 338 с.

4. Фізико-хімічна механіка матеріалів / за ред. В. В. Панасюка. Львів : НАН України, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка, 2010. 448 с.

5. Ahn J., Hwang B., Song E. P., Lee S., Kim N. J. Correlation of microstructure and wear resistance of Al_2O_3-TiO_2 coatings plasma sprayed with nanopowders. *Metall. Mater. Trans*. 2006. Vol. 37A. P. 1851-1861. DOI:10.1007/s11661-006-0128-5

6. Chang-Jiu Li, Wei-Ze Wang, Yong He. Dependency of fracture toughness of plasma sprayed Al_2O_3 coatings on lamellar structure. *J. Thermal Spray Technology*. 2005. Vol 13. № 3. P. 425-431. DOI:10.1361/10599630419364

7. Morks M. F., Tsunekawa Y., Okumiya M., Shoeib M. A. Splat Microstructure of Plasma Sprayed Cast Iron With Different Chamber Pressures. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2003. Vol. 12(2). P. 282–289. DOI: 10.1361/105996302770348880

8. Антоненко Д. А., Копилов В. І. Тріщиностійкість композитних матеріалів з нанокерамічними складовими. *Вісник Донбаської машинобудівної академії*. 2012. № 3 (28). С. 24–29.

9. Копилов В. І., Смирнов І. В. Вплив параметрів частинок і мікрорельєфу поверхні на формування фізичної площі контакту при газотермічному напиленні. *Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування*. 2008. № 53. С. 5–16.

10. Копилов В. І. Поверхневі фізико-хімічні процеси : навч. посіб., ред. В. І. Копилов, І. В. Смирнов. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 284 с.

11. Порошок для плазмового нанесення покриттів: пат. 69338 Україна: МПК С23С4/10. №201112209; заявл. 18.10.2011; опубл. 25.04.2012; бюл. № 8.

12. Копилов В. І. Адгезійні властивості і міцність зчеплення газотермічних покриттів. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»* / В. І. Копилов, І. В. Смирнов, Д. О. Антоненко. Київ, 2010. № 1. С. 93–103.

13. Поверхневі властивості розплавів та твердих тіл та їх використання у матеріалознавстві / за ред. Найдича Ю. В. Київ : АН УРСР, ін.-т пробл. матеріалознавства ім. І. М. Францевича. Наук. думка, 1991. 280 с.

14. Hu M. S., Evans A. G. The cracking and decohesion of thin films on ductile substrates. *Acta metall*. 1989. Vol. 37, № 3. P. 917–925. DOI: https://doi.org/10.1016/0001-6160(89)90018-7

References

1. Kopylov V. I., Smirnov I. V., Sieliverstov I. A. (2019) *Formuvannya ta vlastivosti plazmovikh bagatofaznikh pokrittiv iz nanorozmirnimi skladovimi: monografiia* [Formation and properties of plasma multiphase coatings with nanoscale components: monography]. Kyiv : Naukova dumka. (in Ukrainian)

2. Kopylov V. I. (2016) Effect of multiphase structure of plasma coatings on their elastic and strength properties. *Eastern-Eurohean Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 5/5 (83), pp. 49–57. DOI:10.15587/1729-4061.2016.79586

3. Rozov Yu. G., Sieliverstov I. A., Soshko V. O. (2010) Materialoznavstvo i tekhnologiya konstruktsiinikh materialiv: navch. posib. [Materials science and technology of structural materials: a textbook]. Kherson : Oldi-plyus. (in Ukrainian)

4. Panasyuk V. V. (ed.) (2010) *Fiziko-himichna mehanika materialiv* [Physicochemical mechanics of materials], Lviv : National Academy of Sciences of Ukraine, Karpenko Institute of Physics and Mechanics. (in Ukrainian).

5. Ahn J., Hwang B., Song E. P., Lee S., Kim N. J. (2006) Correlation of microstructure and wear resistance of Al_2O_3-TiO_2 coatings plasma sprayed with nanopowders. *Metall. Mater. Trans*., vol. 37A, pp. 1851–1861. DOI: 10.1007/s11661-006-0128-5

6. Chang-Jiu Li, Wei-Ze Wang, Yong He (2005) Dependency of fracture toughness of plasma sprayed Al_2O_3 coatings on lamellar structure. *J. Thermal Spray Technology*, vol 13, no 3, pp. 425–431. DOI: 10.1361/10599630419364

7. Morks M. F., Tsunekawa Y., Okumiya M., Shoeib M. A. Splat (2003) Microstructure of Plasma Sprayed Cast Iron With Different Chamber Pressures *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 12(2), pp. 282–289. DOI: 10.1361/105996302770348880

8. Antonenko D. A., Kopilov V. I. (2012) *Trishinostijkist kompozitnih materialiv z nanokeramichnimi skladovimi* [Crack resistance of composite materials with nanoceramic components]. Visnik Donbaskoi mashinobudivnoi akademii [Donbass Machine-Building Academy], vol. 3 (28), pp. 24–29. (in Ukrainian).

9. Kopylov V. I., Smirnov I. V. (2008) *Vpliv parametriv chastinok i mikrorelyefu poverhni na formuvannya fizichnoyi ploshi kontaktu pri gazotermichnomu napilenni* [Influence of particle parameters and surface microrelief on the formation of physical contact area during gas-thermal spraying]. *Visnyk NTUU "KPI". Mashinostroenie* [Machine-Building], vol. 53, pp. 5–16. (in Ukrainian).

10. Kopylov V. I. (2012) *Poverhnevi fiziko-himichni procesi: navch. posib*. [Surface physicochemical processes: a textbook]. Kyiv : NTUU "KPI". (in Ukrainian).

11. *Poroshok dlya plazmovogo nanesennya pokrittiv* [Plasma coating powder] (2011) Pat. 69338 Ukraine: MPK C23S4/10. №201112209; zayavl. 18.10.2011; opubl. 25.04.2012; byul. № 8. (in Ukrainian).

12. Kopylov V. I. (2010) *Adgezijni vlastivosti i micnist zcheplennya gazotermichnih pokrittiv* [Adhesive properties and adhesion strength of gas-thermal coatings]. Kopilov V. I., Smirnov I. V., Antonenko D. O. (ed.). *Naukovi visti NTUU "KPI"*, no. 1, pp. 93–103. (in Ukrainian)

13. Najdich Yu. V. (ed.) (1991) *Poverhnevi vlastivosti rozplaviv ta tverdih til ta yih vikoristannya u materialoznavstvi* [Surface properties of melts and solids and their use in materials science]. Academy of Sciences of the USSR, Frantzevych Institute of Materials Science. Nauk. dumka. (in Ukrainian).

14. Hu M. S., Evans A. G. (1989) The cracking and decohesion of thin films on ductile substrates. *Acta metall*, vol. 37, no. 3, pp. 917–925.

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 22.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 621.9 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.18

В. В. КРУПА
кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри конструювання верстатів, інструментів та машин
Тернопільський національний технічних університет імені Івана Пулюя
ORCID: 0000-0001-5634-0053

Ю. О. АПОСТОЛ
старший викладач кафедри приладів і контрольно-вимірювальних систем
Тернопільський національний технічних університет імені Івана Пулюя
ORCID: 0000-0003-2115-3949

Ю. І. ЩЕРБАНЬ
магістрант
Тернопільський національний технічних університет імені Івана Пулюя
ORCID: 0009-0007-8710-9728

О. С. ТАРАПАТА
магістрант
Тернопільський національний технічних університет імені Івана Пулюя
ORCID: 0009-0009-6633-2458

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ТА ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ СВЕРДЛІННІ ГАРТОВАНОЇ ЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ ГАРМАТНИМ СВЕРДЛОМ

Проаналізовано праці з свердління глибоких отворів та дослідження їх якісних показників. Встановлено значну кількість праць, які стосуються глибокого свердління та розділено їх на категорії. Виявлено, що параметри як самого процесу так і якісні параметри отворів в заготовках з різних матеріалів може значно відрізнятись при одних і тих же режимах різання та інструменті. Проведено процес свердління глибокого отвору діаметром 40 мм в заготовці з гартованої сталі (28-32 HRC) 38ХН3МФА-Ш з охолодженням спеціальною оливою для глибокого свердління (застосовували свердло фірми Botec тип 110) на різних подачах. Дослідження проводили при схемі обробки, при якій заготовка обертається з частотою 100 об/хв, а свердло має частоту обертання (в протилежну сторону відносно заготовки) з частотою 260 об/хв, забезпечуючи швидкість різання, рекомендовану виробником. Свердлу надавали поздовжню подачу. Встановлено величини подач, на яких можливо застосовувати дане свердло на вищезазначеній марці сталі (використовували від 0,02 до 0,05 мм/об). На кожній із подач перевіряли значення параметрів процесу обробки, а також оцінювали стружку, яка утворювалась. Зважаючи, що шорсткість поверхні утворювалась не однакова, на одній і тій самій заготовці встановлювали середнє значення параметру Ra, дисперсії її розсіювання та середнє квадратичне відхилення. Побудовано графіки залежностей середнього значення параметра Ra від подачі, а також дисперсії розсіювання D(Ra) від величини подачі. Виявлено, що збільшення подачі до 0,04 мм/об позитивно впливає як на стружку, що сходить, так і на середні значення і дисперсії розсіювання параметра Ra. При збільшенні подачі до 0,05 мм/об процес різання відбувався нестабільно. За критеріями Стьюдента і Фішера відповідно оцінювали суттєвість відмінностей значень шорсткості за середніми значеннями та дисперсіями, а також встановлювали стабільність процесу обробки. За результатами встановили, що за даних умов найдоцільніше встановлювати подачу s=0,04 мм/об., при якій спостерігається найменша дисперсія розсіювання параметра Ra і виходить стабільна стружка.

Ключові слова: *глибоке свердління, параметри стружки, середнє значення шорсткості, стабільність процесу.*

© Крупа В. В., Апостол Ю. О., Щербань Ю. І., Тарапата О. С., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

V. V. KRUPA
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Machine Tool, Tool and Machine Design
Ternopil Ivan Puliuj National Technical University
ORCID: 0000-0001-5634-0053

YU. O. APOSTOL
Senior Lecturer at the Department of Instruments
and Control-Measurement Systems
Ternopil Ivan Puliuj National Technical University
ORCID: 0000-0003-2115-3949

YU. I. SHCHERBAN
Master's Student
Ternopil Ivan Puliuj National Technical University
ORCID: 0009-0007-8710-9728

O. S. TARAPATA
Master's Student
Ternopil Ivan Puliuj National Technical University
ORCID: 0009-0009-6633-2458

STUDY OF PROCESS PARAMETERS AND SURFACE ROUGHNESS WHEN DRILLING HARDENED ALLOY STEEL WITH A GUN DRILL

The works on drilling deep holes and the study of their quality indicators were analyzed. A significant number of works related to deep drilling were identified and divided into categories. It was found that the parameters of both the process itself and the quality parameters of holes in workpieces made of different materials can differ significantly with the same cutting modes and tool. The process of drilling a deep hole with a diameter of 40 mm in a workpiece made of hardened steel (28-32 HRC) 38CrNi3MoVA was carried out with cooling with special oil for deep drilling (Botec type 110 drill was used) at different feeds. The research was carried out with a processing scheme in which the workpiece rotates at a frequency of 100 rpm, and the drill has a rotation frequency (in the opposite direction relative to the workpiece) of 260 rpm, providing the cutting speed recommended by the manufacturer. The drill was provided with a longitudinal feed. The feed rates at which it is possible to use this drill on the above-mentioned steel grade were established (from 0.02 to 0.05 mm/rev were used). On each of the passes, the values of the parameters of the processing process were checked, as well as the chips that were formed were evaluated. Taking into account that the surface roughness was not the same, the average value of the Ra parameter, the variance of its dispersion, and the mean square deviation were determined on the same workpiece. Graphs of the dependences of the average value of the Ra parameter on the feed rate, as well as the dispersion D(Ra) on the feed rate were constructed. It was found that increasing the feed rate to 0.04 mm/rev has a positive effect on both the outgoing chips and the average values and dispersion of the Ra parameter. When the feed rate was increased to 0.05 mm/rev, the cutting process was unstable. According to the Student and Fisher criteria, the significance of the differences in roughness values was assessed by the average values and variances, and the stability of the machining process was established. According to the results, it was found that under these conditions it is most appropriate to set the feed rate s=0.04 mm/rev., at which the smallest dispersion of the Ra parameter is observed and stable chips are obtained.

Key words: *deep drilling, chip parameters, average roughness value, process stability.*

Постановка проблеми

Проблеми свердління глибоких отворів є особливо актуальною в наш час. Необхідність виготовлення відповідних деталей машин із нових матеріалів, або з матеріалів із покращеними фізико-механічними властивостями разом із наявними на ринку спеціальними різальним інструментами вимагають нових досліджень щодо меж їх застосування. Для груп матеріалів у довідниках висвітлюють діапазон швидкості різання та подачі. Проте інформація, як впливають ці параметри на якісні показники оброблюваних отворів, в більшості випадків відсутня. Дуже часто доводиться оброблювати гартовані матеріали з підвищеними фізико-механічними характеристиками (наприклад високолеговані сталі), для яких важко вибрати однозначно групу свердління і часто виявляється, що рекомендовані режими обробки неможливо відтворити. Тому дослідження впливу подачі на шорсткість поверхні при глибокому свердлінні гартованої високоякісної сталі є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанням глибокого свердління займалась велика кількість вчених, роботи яких можна умовно поділити на кілька напрямів [1]. Одним із напрямів є аналіз технологій отримання глибоких отворів [1, 2], зокрема і технологій отримання глибоких отворів нетрадиційними методами [1, 3, 4]. При глибокому свердлінні найчастіше

використовуються гарматні свердла або свердла ВТА різних фірм виробників, які надають рекомендовані режими обробки, а також циліндричні спіральні свердла [5, 6]. Найбільше праць в області дослідження саме процесу оброблення глибоких отворів, зокрема вібрацій [7]. В роботі [8] здійснено дослідження оптимальної кількості стійких упорів, що використовуються в свердлильному верстаті, шляхом встановлення емпіричного зв'язку між максимальною амплітудою на резонансній частоті та довжиною та діаметром свердління. Проблема вібрації під час процесу глибокого свердління суттєво впливає на ефективність процесу та якість поверхні отвору, тому даний напрям широко висвітлений в роботах дослідників [9–13], зокрема вирішується важливе питання зменшення вібрації в процесі обробки різними методами, в тому числі і дослідженням жорсткості верстатів [14, 15]. Також існують праці, в яких досліджують вплив накладених вимушених вібрацій для покращення параметрів процесу свердління глибоких отворів [16–18], що є досить перспективним, але вимагає додаткового обладнання.

Окремо слід виділити роботи [19–24], присвячені конструкціям як окремих інструментів для оброблення глибоких отворів так і окремим компонентам системи ТОС. Дослідники [19, 20] та ін зосередили увагу на розробленні додаткових пристроїв які б полегшували процес свердління глибоких отворів. У працях іншого типу в цьому напрямі удосконалюється конструкція самого свердла. В [21–23] розроблено конструкції інструментів та проаналізовано вплив геометричних параметрів на якісні показники процесу оброблення. В роботі [24] розроблено модель та визначено критичні елементи геометрії свердла, які призводять до поганого відведення стружки. На основі цього дослідження запропоновано нову конструкцію, що дозволяє краще відводити стружку і прокачувати змащувально-охолоджувальну рідину.

Деякі дослідники вивчають питання ефективності процесу та його підвищення [25–27], що полягає в розробленні математичних моделей та дослідженні процесу різання з метою максимізації величини подачі при необхідних якісних параметрах отвору [28, 29].

В праці [30] досліджено взаємозв'язок між тиском охолоджувальної рідини та деформацією скручування стружки на різних стадіях росту стружки на основі для аналізу морфології стружки. Вивчено механізму руйнування стружки під час глибокого свердління нержавіючої сталі 304 за допомогою скануючої електронної мікроскопії (СЕМ) та виявлено зв'язок між утворенням стружки та параметрами процесу обробки. В [31] досліджено вплив тиску охолоджувальної рідини та геометрію стружколома на параметри процесу та встановлено їх оптимальні значення. В [32] дослідники стверджують, що збільшення тиску охолоджувальної рідини забезпечує ефективніше охолодження, стабілізацію коливань температури в зоні різання та покращене видалення стружки, що безпосередньо призводить до зменшення викришування та більш рівномірного зносу інструменту.

Найбільша кількість праць присвячена саме дослідженні впливу елементів режимів різання саме на якісні показники отворів та шляхи їх покращення. Так в [33] досліджено шорсткості поверхні для процесу глибокого свердління отворів з використанням алгоритму оптимізації moth-flame. Автори зазначають, що параметром обробки, який має найбільший вплив на шорсткості поверхні, є швидкість шпинделя з 65,54 %, тоді як найменший – глибина отвору з 0,8 %. У [34] стверджується що швидкість різання та швидкість подачі мають великий вплив на якість обробки, а тиск змащувально-охолоджувальної рідини головним чином впливає на шорсткість поверхні.

Проте кожен матеріал має свої особливості як використання так і механічного оброблення. В даній статті здійснена спроба проаналізувати вплив подачі на шорсткість обробки при глибокому свердлінні гартованої легованої високоякісної сталі 38ХН3МФА-Ш, що має певні особливості як з точки зору застосування так і обробки.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є дослідження впливу подачі на шорсткість поверхні та параметри процесу свердління глибоких отворів в гартованій легованій високоякісній сталі 38ХН3МФА-Ш гарматним свердлом.

Основні завдання:

1. Провести глибоке свердління гарматним свердлом експериментальному зразку з сталі 38ХН3МФА-Ш та встановити параметри процесу при різних величинах подачі.

2. Провести вимірювання шорсткості поверхні (Ra) та встановити характеристики її розсіювання.

3. Оцінити вплив подачі на параметри процесу та шорсткість поверхні при свердлінні сталі 38ХН3МФА-Ш гарматним свердлом.

Викладення основного матеріалу дослідження

Методи дослідження. Для глибокого свердління $L/D > 25$ найчастіше використовуються гарматні свердла або свердла ВТА різних фірм виробників, які надають рекомендовані режими обробки. Наприклад, згідно [35] для свердління отворів діаметром 40 мм гарматним свердлом фірми Botec тип 110 при обробленні легованих нержавіючих сталей свердлами з припаяною твердосплавною головкою рекомендована швидкість різання 40–80 м/хв, подача 0,063–0,247 мм/об, а для оброблення гартованих сталей швидкість різання 25–60 м/хв, подача – 0,086–0,1 мм/об. Практика використання таких свердел на промисловому підприємстві показує, що при встановленні навіть мінімальної рекомендованої подачі при оброблення гартованих легованих сталей, процес різання або не відбувається, або відбувається з значними вібраціями, на поверхні спостерігаються задири і якість просвердленого отвору не відповідає необхідним параметрам.

Для проведення досліджень було вибрано гартовану сталь (28-32 HRC) 38ХН3МФА-Ш, що застосовується для найбільш відповідальних важконавантажених деталей, які працюють при температурах до 400 °С з ударною в'язкістю 780кДж/м^2, з охолодженням спеціальним маслом для глибокого свердління. Для такої сталі відпрацьована швидкість різання становить 45 м/хв. Така швидкість різання забезпечує високу продуктивність оброблення і стійкість інструменту.

Для оброблення використовувався верстат для глибокого свердління. В якості оправки використовували фасону трубу з V-подібною канавкою для відведення стружки. Схема свердління показана на рис. 1. Інструмент для обробки - гарматне свердло одностороннього різання тип 110 фірми Botec стандартного заточування з двома отворами для підведення змащувально-охолоджувальної рідини, що показана на рис. 2. Свердло оснащене двома напрямними поверхнями, що забезпечують компенсацію сил різання, і забезпечують пригладжувальний ефект. Згідно досліджень [36] саме напрямні забезпечують значне зниження шорсткості оброблюваної поверхні.

Проведено дослідження впливу подачі на шорсткість обробленої поверхні. При мінімальній заявленій подачі 0,063 мм/об – стабільного процесу різання досягти не вдавалось на існуючому обладнання. Дослідження проводили на подачах 0,02, 0,025, 0,03, 0,035, 0,04, 0,045 та 0,5 мм/об. Для цього програмно задавали подачу, збільшуючи її через кожні 150 мм. А наступних заготовках подачу змінювали в зворотньому порядку (крім подачі 0,05 мм/об). Свердління проводили з застосуванням спеціальної масляної емульсії для глибокого свердління. Подача емульсії – через осьові отвори в свердлі під тиском 20 бар.

Результати досліджень. Характеристики процесу різання та фото стружок, описані згідно рекомендацій [37] при кожній із подач подано в таблиці 1.

Для вимірювання шорсткості використовували профілометр мод. 296. Для процесу вимірювань заготовку розрізали на циліндри (на кожному циліндрі інша подача. Коло кожного циліндра умовно розділили на 8 частин і на кожній поділці робили 4 траси вимірювань (в межах базової довжини) (рис. 4). Базову довжину встановлювали відповідно до рекомендацій діючого стандарту.

Фото вимірювань показано на рис. 5.

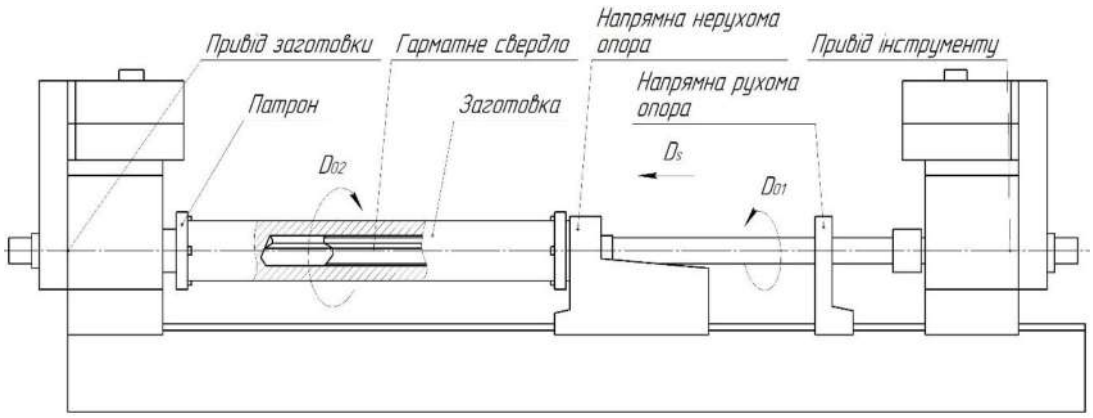


Рис. 1. Схема обробки

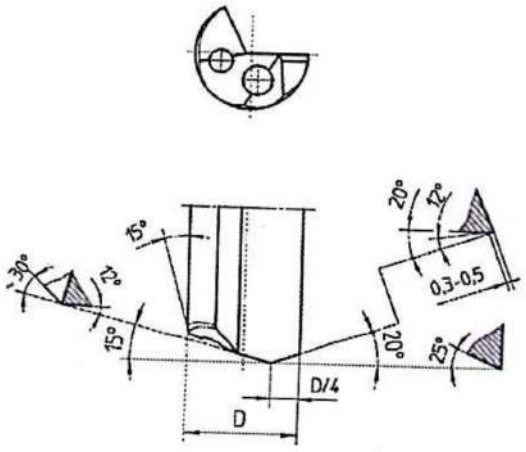


Рис. 2. Геометричні параметри свердла (фірми Botec)

Таблиця 1

Характеристики процесу різання та фото стружок

№ заг.	Подача, мм/об	Характеристики процесу	Фото стружки
1	0,02	Машина працює в стабільному режимі без лишніх шумів та вібрацій, стружка пряма, суцільна дуже зім'ята та покручена в ріні сторони та з характерним слідом хвилястості на вершині	Рис. 3, *а*
2	0,025	Машина працює в стабільному режимі без лишніх шумів та вібрацій. Стружка залишається дуже зім'ятою, особливо по краях проте зі слідами тертя. Стала спіралеподібною з нестабільним кроком.	Рис. 3, *б*
3	0,03	Машина працює в стабільному режимі без лишніх шумів та вібрацій. Стружка залишається місцями зім'ятою, особливо по краях. Спіралеподібність стала стабільною з кроком 120–130мм	Рис. 3, *в*
4	0,035	Машина працює в стабільному режимі без лишніх шумів та вібрацій. Стружка стабільна, залишилась деяка зім'ятість, особливо по краях. Крок спіралі 130–140 мм	Рис. 3, *г*
5	0,04	Машина працює в стабільному режимі без лишніх шумів та вібрацій. Стружка стабільна, спіралеподібна, гладка, блискуча, без ознак перегріву. Крок спіралі 150–170 мм	Рис. 3, *д*
6	0,045	Процес різання став важким, з'явився негучний звук і невеликі вібрації. На стружці з'явились хвильки по краях, що є свідченням появи коливань. Спостерігається стрибкоподібна зміна сил різання	Рис. 3, *е*
7	0,05	**До кінця експеремент не доведено**, через великі вібрації, викликані, слабкою здатністю сверла різати на такій подачі. Великі перевантаження на верстат. Різання відбувається не періодично. На стружці спостерігаєтья хвилястість і задири. При зменшенні швидкості різання в 1,5 рази (і результат незмінний, при збільшенні – стружка темніє, що свідчить про перегрів, вібрації збільшуються. Зменшення подачі на оберт призводить до поновлення процесу різання	Рис. 3, *є*

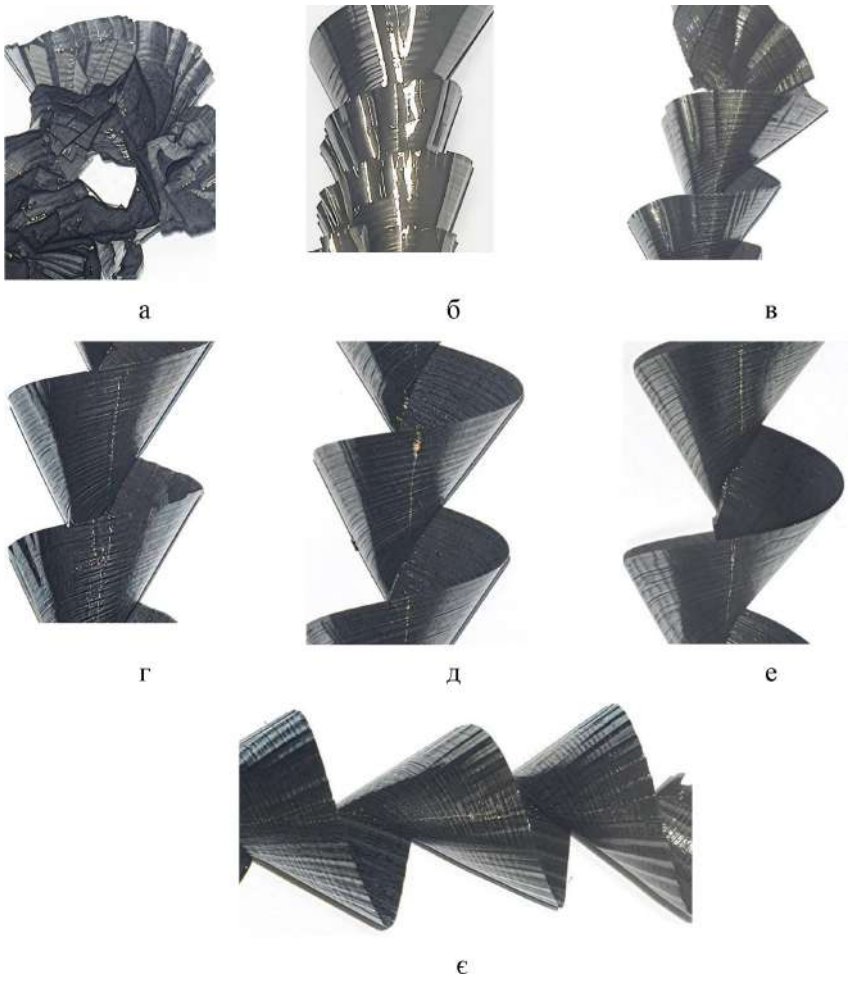


Рис. 3. Фрагменти фотографій стужок при подачах s, мм/об:
а) 0,02; б) 0,025; в) 0,03; г) 0,035; д) 0,04; е) 0,045; є) 0,05

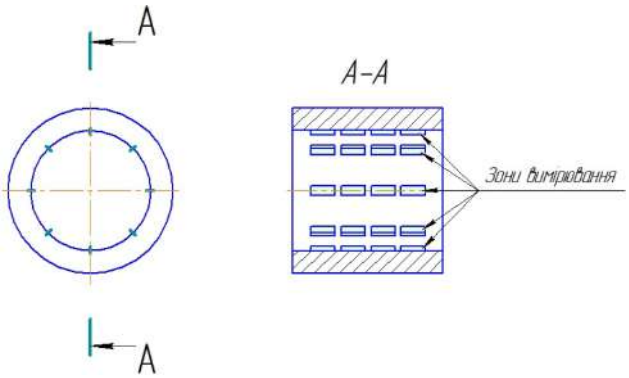


Рис. 4. Схема вимірів на заготовці



Рис. 5. Фото досліджень: 1 – заготовка; 2 – штатив профілометра; 3 – табло профілометра

Обробка результатів дослідження. Таким чином отримували по n = 32 значення параметра шорсткості Ra_i на кожній із заготовок. Визначали середні значення $\overline{Ra}$, дисперсії розсіювань $D(Ra)$ та середні квадратичні відхилення $\sigma(Ra)$, використовуючи залежності [38, 39]

$$\overline{Ra} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Ra_i}{n}; \tag{1}$$

$$D(Ra) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Ra_i - \overline{Ra}\right)^2; \tag{2}$$

$$\sigma(Ra) = \sqrt{D(Ra)}. \tag{3}$$

Для відкидання можливих грубих помилок використовували критерій Гребса, визначаючи значення t_k за формулою [38, 39]:

$$t_k = \frac{\left|Ra_i' - \overline{Ra}\right|}{\sigma(Ra)}. \tag{4}$$

де Ra_i' – значення яке різко виділяється.

У випадку коли за (4) отримували $t_k > t_k'$, де $t_k' = 2{,}792$ (критичне значення критерію Гребса при α = 5 %) перераховували середні значення Ra, $D(Ra)$, $\sigma(Ra)$ за залежностями (1), (2), (3). Результати зведені у таблицю 2.

Таблиця 2

Результати вимірювання параметра шорсткості *Ra*

№ заг.	Частота обертання, об/хв	Подача, мм/хв.	Подача, мм/об.	Параметри шорсткості		
				Середнє значення *Ra*, мкм	Дисперсія розсіюван. *D*(*Ra*)	σ(*Ra*)
1	360	7,2	0,02	0,8387	0,0085	0,0922
2		9	0,025	0,8372	0,0107	0,1036
3		10,8	0,03	0,8249	0,0121	0,1098
4		12,6	0,035	0,7977	0,0088	0,0937
5		14,4	0,04	0,751	0,0047	0,0687
6		16,2	0,045	0,7976	0,0119	0,109

Щоб візуально оцінити взаємозв'язок подачі і шорсткості представимо це графічно. Графік залежності середнього значення Ra від подачі на оберт подано на рис. 6.

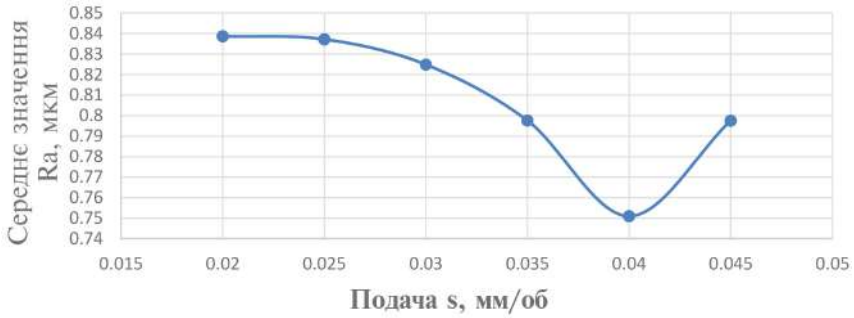


Рис. 6. Графік зміни середнього значення параметра шорсткості *Ra* від подачі на оберт *s*

На перший погляд із збільшенням подачі шорсткість в середньому знижується до величини подачі s = 0.04мм/об, а потім збільшується. Проте зважаючи, що це стохастичні величини і припустивши, базуючись на граничні теоремі Чебишева [38, 39], що величина параметра $\overline{Ra}$ підкоряється нормальному закону розподілу, доцільним буде перевірити суттєвість зміни величини параметра $\overline{Ra}$ від подачі s з застосуванням критерію Стьюдента, використавши залежність [38, 39]

$$t = \frac{\left|\overline{Ra}_i - \overline{Ra}_{i+1}\right|}{\sqrt{\frac{\sigma(Ra)_i}{n_i} - \frac{\sigma(Ra)_{i+1}}{n_{i+1}}}}. \quad (5)$$

Де $\overline{Ra}_i$ – середнє значення параметра Ra на i-тій та i + 1-шій заготовках відповідно; $\sigma(Ra)_i$, $\sigma(Ra)_{i+1}$ – середнє квадратичне відхилення значення параметра Ra на i-тій та i + 1-шій заготовках відповідно; n_i, n_{i+1} – кількість даних у вибірках; i = 1..6 – номер досліду.

Цікавим є показати графік середньоквадратичного відхилення параметра $D(Ra)$ від величини подачі (рис. 7), оскільки воно показує розсіювання, а отже і стабільність технологічного процесу.

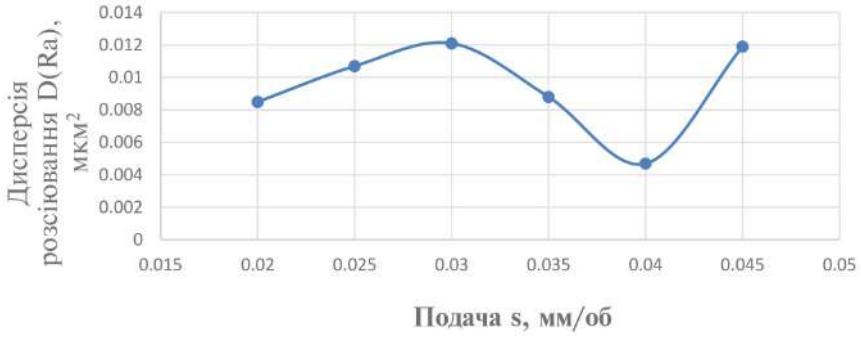


Рис. 7. Графік дисперсії розсіювання *D*(*Ra*) параметра шорсткості *Ra* від подачі на оберт *s*

Бачимо, що до подачі 0,03 дисперсія розсіювання зростає, далі знижується і знову зростає після подачі 0,04. Це пояснюється тим, що при низьких подачах процес різання хоч і візуально стабільний, проте зім'ята стружка свідчить про наявність коливань, що спричиняють мікрозміщення, які призводить до зміни параметра шорсткості на різних частинах поверхні. Малі подачі на оберт, які співмірні з радіусом радіусної частини головного різального леза свердла призводить до нестабільності геометрії різання, викликає велике зминання, змінює кут різання, що в свою чергу збільшує розсіювання величини мікронерівностей на різних частинах поверхні. Для детальнішого аналізу перевіримо суттєвість розсіювань за критерієм Фішера, використавши залежність [38, 39]

$$F = \frac{D(Ra)_i}{D(Ra)_{i+1}}. \quad (6)$$

Результати обчислень критеріїв Стьюдента (5) та Фішера (6) подані в таблиці 3.

Таблиця 3

Результати вимірювання параметра шорсткості *Ra*

№ заг.	Подача, мм/об	Параметри шорсткості			Критерій Стьюдента *t* (ймовірність за розподілом Стьюдента *P*(*t*)		Критерій Фішера *F*	
		Середнє значення *Ra*, мкм	Дисперсія розсіюван. *D*(*Ra*)	σ(*Ra*)				
1	0,02	0,8387	0,0085	0,0922	0,019		1,259	
2	0,025	0,8372	0,0107	0,1036	(0.9848)	0,151		1,131
3	0,03	0,8249	0,0121	0,1098	0,341	(0,88)	1,375	
4	0,035	0,7977	0,0088	0,0937	(0,7332)	0,656		1,872
5	0,04	0,751	0,0047	0,0687	0,625	(0,5120)	2,532	
6	0,045	0,7976	0,0119	0,109	(0,5321)			

Зважаючи, що критичне значення критерію Стьюдента для таких вибірок з при рівні значимості $\alpha = 0.05$ та кількості ступенів свободи $df = n_i + n_{i+1} - 2 = 62 t_{крит} = 2$ робимо висновок, що різниця не суттєва, тобто подача на цьому діапазоні суттєво не впливає на шорсткість поверхні. Найменша ймовірність $P(t) = 0{,}512$, що значно більша 0,05. Тому можна стверджувати, що відмінність несуттєва.

За таблицями знаходимо критичне значення критерію Фішера $Ft = 1.8221$ (для рівня значущості $\alpha = 0.05$). Бачимо, що критерієм Фішера, що при зміні подачі до 0,035 мм/об значення F не перевищують критичне, тобто дисперсії можна вважати такими, що змінюються несуттєво. При зміні подачі до $\sigma = 0.04$ значення критерію Фішера на рівні критичного, що свідчить про суттєвість значення, тобто спричиняє значне покращення стабільності процесу оброблення. При зміні подачі з 0,04 до 0,045 мм/об значення критерію $F = 2.532$ перевищує критичний поріг, тож у цій парі вибірок дисперсії суттєво відрізняються з імовірністю помилки <5 %. А відповідно зміна подачі з 0,04 до 0,045 мм/об значно погіршує стабільність процесу.

Висновки

1. На основі розробленої методики проведено процес глибокого свердління гарматним свердлом експериментальному зразку з сталі 38ХН3МФА-Ш (гартованої до 28–32 HRC) та проаналізовано параметри процесу і типи стружок. Виявлено, що при подачі $s = 0.05$ мм/об процес свердління не стабільний. Наведено фотографії зразків стружок при різних подачах та подано їх аналіз.

2. Проведено вимірювання шорсткості поверхні (*Ra*) та встановлено його середнє значення і різних рівномірно розміщених участках заготовок, а також проведено розрахунок дисперсії розсіювання та середньоквадратичного відхилення. Виявлено, що із збільшенням подачі від 0,02 до 0,04 мм/об величина *Ra* незначно зменшується, а також зменшується і його дисперсія розсіювання. При збільшенні подачі Ra і дисперсія її розсіювання збільшуються характеристики її розсіювання.

3. На основі критерію Стьюдента встановлено, що подача у діапазоні 0,02–0,045 незначно впливає на середнє значення Ra. На основі критерію Фішера доведено, що із збільшенням подач ідо 0,04 мм/об розсіювання величини шорсткості незначне, а при збільшенні s до 0,45 мм/об спостерігається суттєве збільшення дисперсії розсіювання шорсткості, а відповідно і погіршується параметри стабільності процесу.

Список використаної літератури

1. Jayaprakash B. C., Nagarajan L., Kumar M. Recent research progress in deep hole drilling process: a review. Surface Review and Letters. 2021. Vol. 28. DOI: 10.1142/S0218625X21300033

2. Karpovych I., Savinkin D. Analysis of technologies for obtaining and processing deep holes in thick-walled parts. Journal of Rocket-Space Technology. 2024. Vol. 33, No. 4–28. P. 63–67. DOI: 10.15421/452426

3. Скрипченко М. О. Технологічне забезпечення глибокого свердління: дис. … канд. техн. наук. Суми: Сумський державний університет, 2015.

4. Васильєв А. В., Попов С. В., Тимошенко І. В. Підвищення ефективності глибокого свердління сталевих заготовок. Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. 2014. № 2. С. 206–212.

5. Маршуба В. П., Чернякова О. В. Основні напрямки підвищення точності та продуктивності глибокого свердлення спіральними свердлами. Машинобудування. 2010. № 6. С. 72–84.

6. Кобельник В. Р. Підвищення ефективності процесу свердління наскрізних отворів регулюванням подачі: дис. … канд. техн. наук, спец. 05.03.01. Тернопіль, 2013. 168 с.

7. Jingmin M., Wenli Y. Stability analysis of free vibration of gun drill rod materials. Materials. 2025. Vol. 18, No. 6. P. 1241. DOI: 10.3390/ma18061241

8. Lingfei K., Shuai C., Jih-Hua C., Yue S., Falin M., Yan L. Vibration suppression of drilling tool system during deep-hole drilling process using independence mode space control. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2020. Vol. 151. 103525. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2020.103525

9. Biermann D., Schmidt R., Strodick S. Numerical modelling of the BTA deep hole drilling process. Procedia CIRP. 2024. Vol. 123. P. 470–475.

10. Licheng L., Can N., Liu G. Analysis and development of the CFRP boring bar for stability improvement. Fibers and Polymers. 2023. Vol. 24. P. 4413–4427.

11. Orgiyan A., Ivanov V., Tonkonogyi V. The efficiency of dynamic vibration dampers for fine finishing boring. In: Proceedings of the International Conference on Advanced Manufacturing Engineering. Cham: Springer, 2023.

12. Li L., Sun B., Hua H. Analysis of the vibration characteristics of a boring bar with a variable stiffness dynamic vibration absorber. Shock and Vibration. 2019. Article ID 5284194.

13. Bonda A., Srinivas J., Nanda B. K. Investigation of stability in internal turning using a boring bar with a passive constrained layer damping. FME Transactions. 2021. Vol. 49. P. 384–394.

14. Кобельник В. Р., Кривий П. Д. Жорсткість вертикально-свердлильних верстатів. Вісник ЖДТУ. Технічні науки. 2007. № 1 (40). С. 34–40.

15. Кобельник В. Р., Кривий П. Д. Методика дослідження кінематичної точності механізму подач вертикально-свердлильних верстатів на прикладі верстата моделі 2Н118. Процеси механічної обробки в машинобудуванні: зб. наук. праць. 2010. Вип. 8. С. 99–108.

16. Guba N., Schumski L., Paulsen T., Karpuschewski B. Vibration-assisted deep hole drilling of the aluminum material AlMgSi0.5. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2022. Vol. 36. P. 57–66. DOI: 10.1016/j.cirpj.2021.11.002

17. Lingfei K., Jih-Hua C., Yan L., Yanjun L., Pengyang L. Targeted suppression of vibration in deep hole drilling using magneto-rheological fluid damper. Journal of Materials Processing Technology. 2014. Vol. 214, No. 11. P. 2617–2626. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.05.029

18. Shao Z. et al. Deep hole drilling of large-diameter titanium alloy with a novel rotary low-frequency vibration device. IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 154872–154881. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2944433

19. Пестунов В. М., Свяцький В. В., Придворова С. В. Механізми розвантаження інструменту при свердленні глибоких отворів. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. 2012. Вип. 25(1). С. 219–223.

20. Пестунов В. М., Свяцький В. В., Свяцька Л. П. Розробка привода для глибокого свердлення методом перехоплення стебла інструмента по його довжині. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. 2008. Вип. 20. С. 169–172.

21. Кривий П. Д., Крупа В. В., Продан В. І. Конструкторсько-технологічні передумови підвищення якості оброблення глибоких отворів тонкостінних циліндрів. Вісник ТДТУ. 2010. Т. 15. № 1. С. 147–156.

22. Кривий П. Д., Крупа В. В. Інструментальне забезпечення процесу комбінованого розточування глибоких отворів тонкостінних циліндрів. Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. 2012. № 2. С. 23–34.

23. Кривий П. Д., Кобельник В. Р., Крупа В. В., Яковлєв В. Г. Розточувальні інструменти з попарно-асиметричним розміщенням лез для оброблення глибоких циліндричних отворів. Технічні науки та технології. 2016. № 2(4). С. 28–35.

24. Woon K. S. et al. Improving coolant effectiveness through drill design optimization in gundrilling. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 370. 012025. DOI: 10.1088/1757-899X/370/1/012025

25. Васильєв А. В., Попов С. В., Тимошенко І. В. Підвищення ефективності глибокого свердління сталевих заготовок. Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка. 2014. № 2. С. 206–212.

26. Новіков Ф. В., Жовтобрюх В. О., Кленов О. С. Розробка й впровадження ефективних операцій механічної обробки деталей гідравлічних систем. Вісник СевНТУ. 2014. Вип. 151. С. 115–121.

27. Крупа В. В. Металорізальні інструменти з асиметричним розміщенням лез для оброблення глибоких отворів циліндрів: дис. … канд. техн. наук, спец. 05.03.01. Тернопіль, 2015. 185 с.

28. Kryvyi P. D., Dzyura V. O., Tymoshenko N. M., Krypa V. V. Technological heredity and accuracy of the cross-section shapes of the hydro-cylinder cylindrical surfaces. In: Proc. Int. Conf. Materials and Processing and the 42nd North American Manufacturing Research Conference. Detroit, USA, 2014. Paper No. MSEC2014-3946.

29. Krupa V. et al. Improved method for determining the feed influence on the tangential cutting force during re-drilling, countersinking and boring based on the small sample theory. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. 2024. DOI: 10.3311/ppme.29952 (дата звернення: 22.05.2025).

30. Lou J., Li L., Dong X. et al. Research on the influencing factors of chip forming in 304 stainless steel deep hole gun drilling. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024. Vol. 134. P. 1447–1461. DOI: 10.1007/s00170-024-14205-3

31. Kočiško M., Pollák M., Grozav S. D., Ceclan V. Influence of coolant properties and chip former geometry on tool life in deep drilling. Applied Sciences. 2023. Vol. 13(14). 8360. DOI: 10.3390/app13148360

32. Ivkovic M., Djurovic S. Influence of coolant pressure on the wear and tool life of gun drills in deep drilling of 24CrMoV5-5 steel. 2025. DOI: 10.24867/JPE-2025-01-019

33. Kamaruzaman A., Zain A., Alwee R., Yusof N., Najarian F. Optimization of surface roughness in deep hole drilling using moth-flame optimization. Elektrika – Journal of Electrical Engineering. 2019. Vol. 18. P. 62–68. DOI: 10.11113/elektrika.v18n3-2.195

34. Liang J., Jiao L., Yan P., Cheng M., Qiu T., Wang X. Research on deep-hole drilling quality of high-strength steel with slender gun drill. 2021. DOI: 10.21203/rs.3.rs-312959/v1

35. Botek. Single flute gundrills, twin fluted drills: catalog. URL: https://www.botek.de/downloads/en/Catalog_ELB_ZLB_E.pdf (дата звернення: 15.09.2025).

36. Li B., Huang C., Chen Z. et al. Change of the machined hole wall surface roughness, microstructure and microhardness of low alloy steel caused by drill-guide-pads during BTA deep hole drilling. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2025. Vol. 139. P. 1595–1605. DOI: 10.1007/s00170-025-15989-8

37. Stephenson D. A., Agapiou J. S. Metal cutting theory and practice. 3rd ed. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. 956 p.

38. Mei C. C. Mathematical analysis in engineering: how to use the basic tools. Cambridge University Press, 1997. 480 p. ISBN 0521587980.

39. Літнарович Р. М. Побудова і дослідження математичної моделі за джерелами експериментальних даних методами регресійного аналізу: навч. посіб. Рівне : МЕГУ, 2011. 140 с.

References

1. Jayaprakash, B. C., Nagarajan, L., & Kumar, M. (2021). Recent research progress in deep hole drilling process: A review. *Surface Review and Letters, 28*. https://doi.org/10.1142/S0218625X21300033

2. Karpovych, I., & Savinkin, D. (2024). Analysis of technologies for obtaining and processing deep holes in thick-walled parts. *Journal of Rocket-Space Technology, 33*(4–28), 63–67. https://doi.org/10.15421/452426

3. Skrypchenko, M. O. (2015). *Tekhnolohichne zabezpechennia hlybokoho sverdlinia* [Technological support of deep drilling] (Doctoral dissertation, Sumy State University).

4. Vasylyev, A. V., Popov, S. V., & Tymoshenko, I. V. (2014). Improving the efficiency of deep drilling of steel billets. *Collection of Scientific Papers of Poltava National Technical University named after Yu. Kondratyuk. Series: Mechanical Engineering, Construction*, (2), 206–212.

5. Marshuba, V. P., & Chernyakova, O. V. (2010). Main directions for improving the accuracy and productivity of deep drilling with twist drills. *Mechanical Engineering, (6)*, 72–84.

6. Kobelnyk, V. R. (2013). Pidvyshchennia efektyvnosti protsesu sverdlinnia naskriznykh otvoriv rehuliuvanniam podachi [Improving the efficiency of through-hole drilling process by feed regulation] (Candidate's thesis). Ternopil.

7. Jingmin, M., & Wenli, Y. (2025). Stability analysis of free vibration of gun drill rod materials. Materials, 18(6), 1241. https://doi.org/10.3390/ma18061241

8. Lingfei, K., Shuai, C., Jih-Hua, C., Yue, S., Falin, M., & Yan, L. (2020). Vibration suppression of drilling tool system during deep-hole drilling process using independence mode space control. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 151, 103525. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103525

9. Biermann, D., Schmidt, R., & Strodick, S. (2024). Numerical modelling of the BTA deep hole drilling process. Procedia CIRP, 123, 470–475.

10. Licheng, L., Can, N., & Liu, G. (2023). Analysis and development of the CFRP boring bar for stability improvement. Fibers and Polymers, 24, 4413–4427.

11. Orgiyan, A., Ivanov, V., & Tonkonogyi, V. (2023). The efficiency of dynamic vibration dampers for fine finishing boring. In Proceedings of the International Conference on Advanced Manufacturing Engineering. Cham: Springer.

12. Li, L., Sun, B., & Hua, H. (2019). Analysis of the vibration characteristics of a boring bar with a variable stiffness dynamic vibration absorber. Shock and Vibration, 2019, 5284194. https://doi.org/10.1155/2019/5284194

13. Bonda, A., Srinivas, J., & Nanda, B. K. (2021). Investigation of stability in internal turning using a boring bar with a passive constrained layer damping. FME Transactions, 49, 384–394.

14. Kobelnyk, V. R., & Kryvyi, P. D. (2007). Zhorstkist vertykalno-sverdlylnykh verstativ [Rigidity of vertical drilling machines]. Visnyk ZhDTU. Tekhnichni Nauky, 1(40), 34–40.

15. Kobelnyk, V. R., & Kryvyi, P. D. (2010). Metodyka doslidzhennia kinematychnoi tochnosti mekhanizmu podach vertykalno-sverdlylnykh verstativ na prykladi verstata modeli 2N118 [Method of studying the kinematic accuracy of the feed mechanism of vertical drilling machines on the example of model 2N118]. Protsesy mekhanichnoi obrobky v mashynobuduvanni, 8, 99–108.

16. Guba, N., Schumski, L., Paulsen, T., & Karpuschewski, B. (2022). Vibration-assisted deep hole drilling of the aluminum material AlMgSi0.5. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 36, 57–66. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.11.002

17. Lingfei, K., Jih-Hua, C., Yan, L., Yanjun, L., & Pengyang, L. (2014). Targeted suppression of vibration in deep hole drilling using magneto-rheological fluid damper. Journal of Materials Processing Technology, 214(11), 2617–2626. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.05.029

18. Shao, Z., et al. (2019). Deep hole drilling of large-diameter titanium alloy with a novel rotary low-frequency vibration device. IEEE Access, 7, 154872–154881. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2944433

19. Pestunov, V. M., Sviatskyi, V. V., & Prydvorova, S. V. (2012). Mekhanizmy rozvantazhennia instrumentu pry sverdlinni hlybokykh otvoriv [Tool unloading mechanisms in deep drilling]. Zbirnyk naukovykh prats KNUTU, 25(1), 219–223.

20. Pestunov, V. M., Sviatskyi, V. V., & Sviatska, L. P. (2008). Rozrobka pryvoda dlia hlybokoho sverdlinnia metodom perekhoplennia stebla instrumenta po yoho dovzhyni [Drive development for deep drilling by clamping the tool shank along its length]. Zbirnyk naukovykh prats KNUTU, 20, 169–172.

21. Kryvyi, P. D., Krupa, V. V., & Prodan, V. I. (2010). Design and technological prerequisites for improving the quality of deep hole processing of thin-walled cylinders. *Bulletin of TDTU, 15*(1), 147–156.

22. Kryvyi, P. D., & Krupa, V. V. (2012). Tool support for the process of combined boring of deep holes in thin-walled cylinders. *Visnyk ZhDTU. Tekhnichni Nauky, (2)*, 23–34.

23. Kryvyi, P. D., Kobelnyk, V. R., Krupa, V. V., & Yakovliev, V. G. (2016). Boring tools with paired asymmetric arrangement of cutting edges for machining deep cylindrical holes. *Technical Sciences and Technologies, 2(4)*, 28–35.

24. Woon, K. S., et al. (2018). Improving coolant effectiveness through drill design optimization in gundrilling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 370*, 012025. https://doi.org/10.1088/1757-899X/370/1/012025

25. Vasylyev, A. V., Popov, S. V., & Tymoshenko, I. V. (2014). Improving the efficiency of deep drilling of steel billets. *Collection of Scientific Papers of Poltava National Technical University named after Yu. Kondratyuk. Series: Mechanical Engineering, Construction, (2)*, 206–212.

26. Novikov, F. V., Zhovtobryukh, V. O., & Klenov, O. S. (2014). Development and implementation of efficient operations for machining hydraulic system parts. *Visnyk SevNTU. Ser.: Mashynopryladobuduvannya ta Transport, (151)*, 115–121.

27. Krupa, V. V. (2015). *Metalorizalni instrumenty z asymetrychnym rozmishchenniam lez dlia obroblennia hlybokykh otvoriv tsylindriv* [Metal-cutting tools with asymmetric arrangement of blades for deep cylinder hole processing] (Candidate's thesis). Ternopil.

28. Kryvyi, P. D., Dzyura, V. O., Tymoshenko, N. M., & Krypa, V. V. (2014). Technological heredity and accuracy of the cross-section shapes of the hydro-cylinder cylindrical surfaces. In *Proceedings of the International Conference on Materials and Processing and the 42nd North American Manufacturing Research Conference* (Paper No. MSEC2014-3946, p. 2). Detroit, MI, USA.

29. Krupa, V., et al. (2024). Improved method for determining the feed influence on the tangential cutting force during re-drilling, countersinking and boring based on the small sample theory. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. https://doi.org/10.3311/ppme.29952

30. Lou, J., Li, L., & Dong, X. (2024). Research on the influencing factors of chip forming in 304 stainless steel deep hole gun drilling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 134*, 1447–1461. https://doi.org/10.1007/s00170-024-14205-3

31. Kočiško, M., Pollák, M., Grozav, S. D., & Ceclan, V. (2023). Influence of coolant properties and chip former geometry on tool life in deep drilling. *Applied Sciences, 13*(14), 8360. https://doi.org/10.3390/app13148360

32. Ivkovic, M., & Djurovic, S. (2025). Influence of coolant pressure on the wear and tool life of gun drills in deep drilling of 24CrMoV5-5 steel. *Journal of Production Engineering*. https://doi.org/10.24867/JPE-2025-01-019

33. Kamaruzaman, A., Zain, A., Alwee, R., Yusof, N., & Najarian, F. (2019). Optimization of surface roughness in deep hole drilling using moth-flame optimization. *ELEKTRIKA – Journal of Electrical Engineering, 18*, 62–68. https://doi.org/10.11113/elektrika.v18n3-2.195

34. Liang, J., Jiao, L., Yan, P., Cheng, M., Qiu, T., & Wang, X. (2021). Research on deep-hole drilling quality of high-strength steel with slender gun drill. *Research Square*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-312959/v1

35. Botec. (2025). Single flute gundrills twin fluted drills [Catalog]. https://www.botek.de/downloads/en/Catalog_ELB_ZLB_E.pdf

36. Li, B., Huang, C., Chen, Z., et al. (2025). Change of the machined hole wall surface roughness, microstructure and microhardness of low alloy steel caused by drill-guide-pads during BTA deep hole drilling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 139*, 1595–1605. https://doi.org/10.1007/s00170-025-15989-8

37. Stephenson, D. A., & Agapiou, J. S. (2016). *Metal cutting theory and practice* (3rd ed.). CRC Press.

38. Mei, C. C. (1997). *Mathematical analysis in engineering: How to use the basic tools* (Rev. ed.). Cambridge University Press.

39. Litnarovych, R. M. (2011). *Pobudova i doslidzhennia matematychnoi modeli za dzherelamy eksperymentalnykh danykh metodamy rehresiinoho analizu* [Construction and study of a mathematical model based on experimental data using regression analysis methods]. Rivne: MEHU.

Дата першого надходження рукопису до видання: 30.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 27.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 621.383.51 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.19

В. В. КУРАК
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-4303-5671

О. В. АНДРОНОВА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-9597-8068

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ МЕРЕЖЕВИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ З МОДУЛЯМИ РІЗНИХ ТИПІВ В КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ ХЕРСОНСЬКОЇ ОБЛАСТІ

В даній роботі проведено розрахунок параметрів трьох варіантів мережевої сонячної електростанції дахового типу для приватного житлового будинку, розташованого в кліматичних умовах Херсонської області. Визначено та проаналізовано енергетичні й економічні показники запропонованих варіантів фотоелектричних станцій, що побудовані на кремнієвих модулях трьох можливих типів: монокристалічних, полікристалічних та тонкоплівкових на основі аморфного напівпровідникового шару.

Розглянуто можливі варіанти комплектації фотоелектричної станцій. Показано, що для покриття потреби об'єкту в електричній енергії в місяць з найменшою сонячною інсоляцією достатньо 15 модулів TWMND-72HS570 на основі монокристалічного кремнію номінальною потужністю 570 Вт кожен. При використанні полікристалічних модулів JKM325PP-72 номінальною потужністю 325 Вт необхідна їх кількість збільшується до 26. У випадку комплектації фотоелектричної станції модулями з аморфним фотоактивним шаром Solar Frontier 175 SF номінальною потужністю 175 Вт кожен мінімальна їх кількість становить 49 шт. В якості мережевого інвертора в усіх трьох запропонованих варіантах фотоелектричної станції обрано однофазний інвертор AXIOMA Energy AXGRID, параметри якого узгоджуються як з фотоелектричним генератором, так і з централізованою електричною мережею, до якої підключено об'єкт.

Розрахунок енергетичних параметрів запропонованих варіантів фотоелектричних станцій показав, що обсяги річної генерації електричної енергії (7400–7500 кВт·год), а відповідно, й її надлишку, який може бути переданий в мережу за «зеленим» тарифом (5100–5200 кВт·год), є співставними незалежно від обраного типу фотоелектричних модулів. Це не дозволяє здійснити однозначний вибір оптимального варіанту станції для практичної реалізації і потребує оцінки економічних показників.

Аналіз економічних показників запропонованих систем дозволив встановити, що для даного об'єкту доцільною буде реалізація проекту мережевої фотоелектричної станції, до складу якої входять 15 модулів TWMND-72HS570 з монокристалічного кремнію, оскільки цей варіант потребує найменших капітальних вкладень та має прийнятний термін окупності та рентабельність інвестицій. В той же час, реалізація проекту на основі тонкоплівкових модулів з аморфним фотоактивним шаром з економічної точки зору виявилась недоцільною.

Ключові слова: *фотоелектрична станція, фотоелектричний модуль, генерація, споживання електричної енергії, централізована електромережа, техніко-економічні показники.*

V. V. KURAK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy,
Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-4303-5671

O. V. ANDRONOVA
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy,
Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-9597-8068

© Курак В. В., Андронова О. В., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

TECHNICAL AND ECONOMIC PARAMETERS OF GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC STATIONS WITH MODULES OF DIFFERENT TYPES IN CLIMATIC CONDITIONS OF KHERSON REGION

In this work the parameters of three variants of rooftop grid-connected solar power station for residential building located in the climatic conditions of the Kherson region were calculated. The energy and economic parameters of the proposed variants of photovoltaic station built on monocrystalline, polycrystallin and thin-film amorphous silicon modules have been determined and analyzed.

Possible configurations of photovoltaic station are considered. It has been shown that 15 monocrystalline silicon modules TWMND-72HS570 with 570 W nominal power are sufficient to cover the building's electrical energy consumption in the month with the lowest solar insolation. When polycrystalline solar modules JKM325PP-72 with 325 W nominal power are used the required number of such modules increases up to 26. In the case when photovoltaic station equipped by Solar Frontier 175 SF amorphous modules with nominal power of 175 W the minimum amount of such modules required is 49 pcs. The AXIOMA Energy AXGRID single-phase inverter was chosen as the grid inverter for all three variants of proposed photovoltaic station since its parameters correspond with both the photovoltaic generator and the centralized electrical grid in all cases mentioned above.

Calculation of the energy parameters of the proposed variants of photovoltaic station showed that the amounts of annual electricity generation (7400 - 7500 kWh) and, accordingly, its surplus which can be transferred to the grid at a "green" tariff (5100 - 5200 kWh) are comparable between the variants regardless of the selected type of photovoltaic modules. This fact does not allow a clear choice of the optimal station variant for practical implementation and requires additional assessment of economic indicators.

Determination of the economic indicators for the proposed systems made it possible to find out that for the residential building under investigation a grid-connected photovoltaic station based on 15 monocrystalline silicon modules TWMND-72HS570 is preferable, since this variant requires the least capital investment and has an acceptable payback period and return on investment. At the same time, the implementation of the project based on thin-film modules with an amorphous photoactive layer turned out to be inexpedient from an economic point of view.

Key words: *photovoltaic station, photovoltaic module, generation, electrical energy consumption, centralized electrical grid, technical and economic parameters.*

Постановка проблеми

Незважаючи на військовий стан і суттєві руйнування енергетичної інфраструктури України внаслідок постійних обстрілів з боку держави-агресора, представники бізнесу і населення намагаються активно впроваджувати проекти «зеленої» генерації, спрямовані, перш за все, на покриття власних потреб в електричній енергії. Лише у першому півріччі 2024 року бізнес увів в експлуатацію 200 МВт нових потужностей сонячних електростанцій, що еквівалентно близько 1/5 встановленої потужності атомного енергоблоку [1]. Пожвавився і сектор будівництва сонячних електростанцій на об'єктах приватних домогосподарств. Так, у 2024 році державними банками України схвалено кредитів на будівництво фотоелектричних станцій на дахах приватних будинків сумарною потужністю 83 МВт, що є абсолютним рекордом для нашої країни за весь час впровадження подібних проектів [1].

Важливим питанням, що потребує вирішення на стадії проектування сонячної електростанції на тому чи іншому об'єкті, є оптимальний вибір обладнання задля забезпечення мінімального строку окупності проекту. Як показує досвід, однією з головних статей в кошторисі проектів мережевих фотоелектричних систем є витрати на фотоелектричні модулі, у зв'язку з чим до питання вибору саме цієї компоненти слід підходити максимально зважено.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогодні промисловістю виготовляється ціла низка фотоелектричних модулів, що базуються на різних напівпровідникових матеріалах, як-то: кремній, сполуки $A^{III}B^{V}$, $A^{II}B^{VI}$ та низка інших [2]. Активно проводяться роботи з пошуку та впровадження у виробництво новітніх більш дешевих та технологічних матеріалів, щоб зменшити собівартість та покращити енергетичні показники фотоелектричних модулів. Такими матеріалами, зокрема, є перовскіти та барвники [3].

Втім, незважаючи на різноманіття матеріалів, що застосовуються для виготовлення фотоелектричних модулів, найбільшого практичного застосування при спорудженні сонячних електростанцій різних типів на даний час отримали модулі на основі кремнію, що обумовлено, передусім, доволі сприятливим співвідношенням між їх електричними параметрами, експлуатаційними показниками та вартістю одиниці потужності [4].

Кремнієві фотоелектричні модулі прийнято поділяти на три великі групи, що відрізняються за кристалічною структурою застосованого напівпровідника: монокристалічні, полікристалічні (мультикристалічні) та тонкоплівкові модулі з аморфного кремнію. Кожна з цих груп модулів має свої переваги і недоліки [2–4]. Так, модулі на основі монокристалічного кремнію мають найбільшу ефективність (близько 20 %), що дозволяє застосовувати меншу площу фотоелектричного генератора для досягнення необхідної встановленої потужності в порівнянні з іншими варіантами кремнієвих модулів, та характеризуються найвищими строками експлуатації, що становлять понад 25 років. Втім, середня вартість одиниці потужності монокристалічного модуля є найвищою.

Найменшу ефективність мають тонкоплівкові модулі з аморфного кремнію (6–8 %). Вони демонструють і найкоротший термін експлуатації, пов'язаний з деградацією структури аморфної плівки внаслідок ефекту Стаблера-Вронського [5]. В той же час, такі модулі є найдешевшими.

Щодо полікристалічних кремнієвих модулів, то їх ефективність є на кілька відсотків меншою за монокристалічні аналоги, але й їх середня вартість дещо менша в порівнянні з модулями на основі монокристалічного кремнію.

Зважаючи на відмінність у технічних параметрах і вартості кремнієвих модулів із зазначених вище груп, вирішення питання щодо застосування модулів того чи іншого типу доцільно проводити на основі попередньої оцінки та аналізу техніко-економічних показників сонячної електростанції, що проектується, індивідуально для кожного конкретного об'єкту та кліматичних умов експлуатації.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є визначення типу фотоелектричних модулів, найбільш доцільних для застосування в мережевій фотоелектричній станції, на прикладі приватного житлового будинку, розташованого в кліматичних умовах Херсонської області.

Викладення основного матеріалу дослідження

В якості об'єкту для розробки мережевої фотоелектричної станції обрано приватний житловий будинок загальною площею 90 м^2, розташований в Бериславському районі Херсонської області. Будинок підключено до централізованої мережі електропостачання з фазною напругою 220 В. Дах будинку є двоскатним з площею південного скату 64 м^2, що розташований під кутом 45° відносно горизонту. Затінення південного скату оточуючими об'єктами протягом світлового дня не спостерігається.

На рис. 1 представлено розподіл середнього денного споживання електричної енергії об'єктом за місяцями, визначений на основі аналізу рахунків від енергопостачальної компанії за останні три роки.

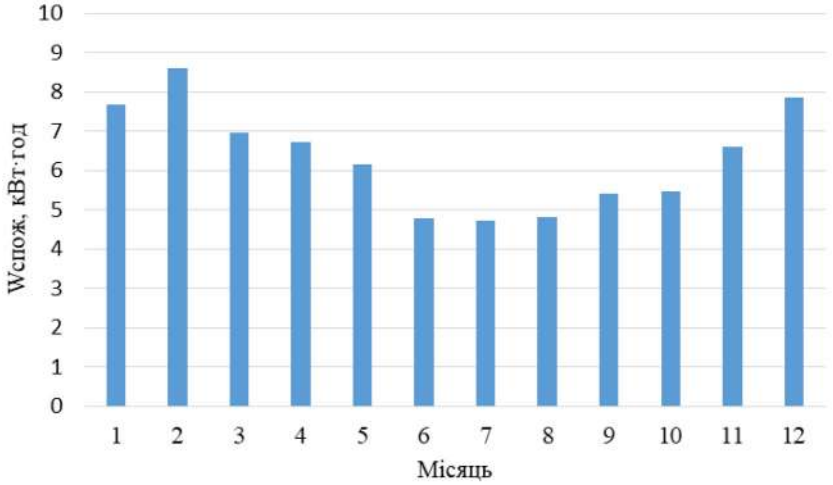


Рис. 1. Розподіл денного споживання електричної енергії будинком за місяцями

Розрахунок параметрів фотоелектричної станції та кількості фотоелектричних модулів виконували за методикою, описаною в [6], виходячи з необхідності покриття потреб об'єкту в електричній енергії в місяць з найнижчим надходженням сонячної радіації (для кліматичних умов Херсонської області – грудень).

Аналізувалась доцільність впровадження на об'єкті трьох варіантів дахових фотоелектричних станцій:

– Варіант А – станція, що складається з однофазного мережевого інвертора AXIOMA Energy AXGRID з номінальною напругою на стороні змінного струму 220/230 В та максимальною ефективністю 97,7 %, а також 15 фотоелектричних модулів TWMND-72HS570 на основі монокристалічного кремнію номінальною потужністю 570 Вт кожен, які формують фотоелектричний генератор сумарною площею 38,7 м^2;

– Варіант Б – станція, побудована на основі сонячного мережевого інвертора AXIOMA Energy AXGRID та фотоелектричного генератора загальною площею 51,5 м^2, що складається з 26 полікристалічних кремнієвих модулів JKM325PP-72 номінальною потужністю 325 Вт кожен;

– Варіант В – станція з мережевим інвертором AXIOMA Energy AXGRID та фотоелектричним генератором площею 59,8 м^2, побудованим на основі 49 модулів з аморфним фотоактивним шаром Solar Frontier 175 SF номінальною потужністю 175 Вт кожен.

В табл. 1 представлено розрахункові енергетичні показники запропонованих варіантів мережевих фотоелектричних станцій.

Таблиця 1

Енергетичні показники дахових фотоелектричних станцій

Місяць	Варіант А		Варіант Б		Варіант В	
	Вироблення, кВт · год	Надлишок, кВт · год	Вироблення, кВт · год	Надлишок, кВт · год	Вироблення, кВт · год	Надлишок, кВт · год
1	352,5	114,8	348,4	110,7	353,5	115,8
2	469,2	228,5	463,7	223	470,6	229,9
3	620,2	404,5	612,9	397,3	622	406,3
4	800,3	598,2	790,9	588,9	802,6	600,6
5	906,5	715,8	895,8	705,2	909,1	718,4
6	743,8	600,2	735,15	591,5	746	602,3
7	781,9	635,9	772,7	626,7	784,2	638,2
8	781,9	632,5	772,7	623,4	784,2	634,8
9	784,9	622,5	775,7	613,4	787,2	624,8
10	604,3	434,6	597,2	427,5	606	436,4
11	338,6	140,6	334,6	136,6	339,6	141,6
12	296,8	53,5	293,4	50	297,7	54,4
Рік	7480,9	5181,9	7393,5	5094,5	7502,9	5203,9

Як показує аналіз даних табл. 1, всі три варіанти фотоелектричних станцій мають близькі енергетичні показники, хоча більш виграшно виглядає варіант В, побудований на основі аморфних модулів, який забезпечує найбільшу генерацію електричної енергії, а отже, і її максимальний надлишок, завдяки дещо вищій сумарній потужності фотоелектричного генератора. Втім, це перевищення в генерації становить близько 1 % і не може вважатись вирішальним при прийняті рішення щодо практичної реалізації на даному об'єкті саме варіанту В. У зв'язку з цим, необхідно провести оцінку економічних показників для кожного із запропонованих варіантів фотоелектричних станцій.

В табл. 2 представлено результати розрахунку економічних показників для запропонованих варіантів мережевих фотоелектричних станцій в цінах на кінець 2024 року. При розрахунку враховували такі статті, як капітальні витрати *К*, експлуатаційні витрати *Е* (приймались на рівні 1 % від капітальних витрат), чистий прибуток *П* за рахунок продажу в мережу надлишку електроенергії за «зеленим» тарифом та економії на оплаті за мережеву електрику завдяки покриттю власних потреб об'єкту, на основі чого оцінювали простий строк окупності проектів *Т* та рентабельність інвестицій R.

Таблиця 2

Економічні показники дахових фотоелектричних станцій

Станція	*К*, грн	*Е*, грн	*П*, грн/рік	*Т*, роки	*R*, %
Варіант А	272 844	2728	41 413	6,59	15,47
Варіант Б	367 389	3674	40 059	9,17	11,05
Варіант В	525 631	5256	39 492	13,31	7,57

Як слідує з табл. 2, найкращі економічні показники демонструє варіант А, побудований на основі фотоелектричних модулів з монокристалічного кремнію, що характеризується найменшими капітальними витратами на реалізацію проекту, головним чином, завдяки мінімальній необхідній кількості модулів такого типу. Цей варіант має найменший строк окупності і найвищу рентабельність інвестицій.

З економічної точки зору найгіршим є варіант В, період окупності якого становить 13,31 роки, що перевищує середній нормативний термін експлуатації модулів з аморфного кремнію (близько 10 років), а отже, такий варіант фотоелектричної станції не може бути рекомендований до реалізації на даному об'єкті.

Висновки

Розроблено три варіанти мережевої фотоелектричної станції для приватного будинку, розташованого в Бериславському районі Херсонської області, що відрізняються між собою типом застосованих фотоелектричних модулів. Розрахунок енергетичних показників розроблених систем показав, що всі варіанти мають близьке вироблення в розрізі типового року, а відповідно, і надлишок генерованої електричної енергії, що не дозволяє здійснити вибір оптимального варіанту для практичної реалізації на об'єкті.

Оцінка економічних показників розроблених систем дозволила встановити, що для даного об'єкту доцільною буде реалізація проекту мережевої фотоелектричної станції, до складу якої входять 15 модулів TWMND-72HS570 з монокристалічного кремнію, оскільки цей варіант потребує найменших капітальних вкладень та має прийнятний термін окупності та рентабельність інвестицій. В той же час, реалізація проекту на основі тонкоплівкових модулів з аморфним фотоактивним шаром є недоцільною за економічними показниками.

Список використаної літератури

1. Ігнатьєв С. Енергетична система України: стан на кінець 2024 року та сценарії на 2025 [Електронний ресурс]. Енергоджерела [Сайт]. Режим доступу: https://enerhodzherela.com.ua/analityka/ (дата звернення 10.09.25). Назва з екрану.

2. Шевчук В. І., Марченко Н. В., Пундєв В. О. Порівняльний аналіз типів сонячних елементів для фотоелектричних модулів. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXII міжнародної науково-практичної конференції*. 20–21 травня 2021 р. Київ. С. 425–429.

3. Новицький С. В., Зур'ян О. В. Фотоелектричні перетворювачі. Види, ефективність. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. № 1(88). 2024. С. 92–102. DOI: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.12

4. Як вибрати сонячні фотомодулі [Електронний ресурс]. Avenston [Сайт]. Режим доступу: https://avenston.com/articles/solar-modules/ (дата звернення 10.09.25). Назва з екрану.

5. Косяченко Л. А., Грушко Є. В. Перспективи застосування тонкоплівкового телуриду кадмію в сонячній енергетиці. *Український фізичний журнал. Огляди 2012*. Т. 7. № 1. 2012. С. 3–30.

6. Курак В. В., Андронова О. В., Погребняк І. Ф. Оцінка вироблення енергії фасадними фотоелектричними системами в кліматичних умовах м. Херсон. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. № 4(91). 2024. С. 85–90. DOI: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.10

References

1. Ignatyev S. Energy system of Ukraine: status at the end of 2024 and scenarios for 2025 [Electronic resource]. Energysources [Site]. Access mode: https://enerhodzherela.com.ua/analityka/ (last access: 10.09.25). Title from the screen.

2. Shevchuk V. I., Marchenko N. V., Pundiev V. O. Porivnyal′nyy analiz typiv sonyachnykh elementiv dlya fotoelektrychnykh moduliv [Comparative analysis of solar cells types for PV modules]. *XXII th International scientific and practical conference "Renewable Energy and Energy Efficiency of the XXI st century"*. May 20–21. 2021. Kyiv. Ukraine. P. 425–429. [in Ukrainian].

3. Novytskyi S. V., Zurian O. V. (2024) Fotoelektrychni peretvoryuvachi. Vydy, efektyvnist′ [Photoelectric converters. Types, efficiency]. *Visnyk of Kherson National Technical University*, no. 1(88), pp. 92-102. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.12

4. How to choose solar PV modules [Electronic resource]. Avenston [Site]. Access mode: https://avenston.com/articles/solar-modules/ (last access: 10.09.25). Title from the screen.

5. Kosyachenko L. A., Grushko E. V. (2012) Perspektyvy zastosuvannya tonkoplivkovoho telurydu kadmiyu v sonyachniy enerhetytsi [Prospects for the Use of Thin-Film Cadmium Telluride in Solar Energetics]. *Ukrainian Journal of Physics. Reviews 2012*, vol. 7, no. 1, pp. 3–30. [in Ukrainian].

6. Kurak V. V., Andronova O. V., Pogrebniak I. F. (2024) Otsinka vyroblennya enerhiyi fasadnymy fotoelektrychnymy systemamy v klimatychnykh umovakh m. Kherson [Evaluation of the facade photoelectric systems energy production in the climate conditions of Kherson]. *Visnyk of Kherson National Technical University*, no. 4(91), pp. 85–90. [in Ukrainian]. DOI: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.10

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 24.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 621.891:631.372:629.114/631.3 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.20

С. В. ЛЯШЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-3227-3738

А. О. КЕЛЕМЕШ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-9429-8570

О. А. БУРЛАКА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-2296-7234

В. В. ЛАВРЕНКО
старший викладач кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0009-0001-6145-9224

ПОКРАЩЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГІЛЬЗ ГІДРОЦИЛІНДРІВ АВТОМОБІЛЬНО-ТРАКТОРНОЇ ТЕХНІКИ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО ЗМІЦНЕННЯ ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЇХ ВІДНОВЛЕННЯ

На основі методів інженерії досягнуто покращення техніко-експлуатаційних характеристик гідроциліндрів автомобільно-тракторної техніки застосувавши комбіновану технологію термомеханічного зміцнення робочої поверхні гільзи гідроциліндра. Проведений аналіз традиційних технологій дозволив визначити їхні обмеження та обґрунтувати напрями вдосконалення. Запропонований процес поєднує нагрівання, деформуюче механічне накатування та температурний відпуск, для реалізації яких підібрано відповідне обладнання й інструмент. Експериментальні дослідження підтвердили ефективність розроблених рішень: визначено температуру деформації ($T_{деф}$), ступінь деформації (λ) та температуру відпуску ($T_{відп}$) поверхні, розподіл твердості за товщиною стінки, а після обкатки – величину зносу.

Оптимальними режимами термомеханічного зміцнення слід приймати: температуру деформації 850–880 ℃, ступінь деформації 14–18 % та температуру відпуску 170–240 °С.

Запропонована технологія порівняно з промисловим виробництвом забезпечує:

– збереження твердості на рівні 42–50 HRC при більш ніж дворазовому підвищенні пластичності;

– збільшення глибини зміцненого шару в 1,25 рази, що дозволяє проводити ремонт за ремонтними розмірами;

– зниження напруженості поверхневого шару у 4–10 разів;

– підвищення стабільності механічних властивостей, підтверджене зменшенням коефіцієнтів варіації твердості у 1,6–1,7 рази та пластичності – у 1,8–2,3 рази.

Порівняльний аналіз показав суттєві переваги нової технології, зокрема зростання продуктивності обробки до 4 разів, зменшення витрат на інструмент утричі та загальне здешевлення процесу відновлення гільз гідроциліндрів. Встановлено, що застосування запропонованої технології забезпечує зміцнення поверхневого шару на глибину до 0,25 мм і досягнення шорсткості, наближеної до експлуатаційної.

Метою досліджень є підвищення довговічності та надійності гільз гідроциліндрів за рахунок застосування термомеханічного зміцнення, що сприятиме вдосконаленню процесів відновлення гідравлічних систем автомобільно-тракторної техніки.

Об'єкт дослідження: гільза гідроциліндра автомобільно-тракторної техніки, яка зазнає зношування в умовах експлуатації та підлягає відновленню з використанням технологій зміцнення.

Предмет дослідження: процеси термомеханічного зміцнення робочої поверхні гільзи гідроциліндра, що впливають на їх довговічність, надійність та ремонтопридатність.

© Ляшенко С. В., Келемеш А. О., Бурлака О. А., Лавренко В. В., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Методи досліджень. Дослідження базувалися на використанні методів фізичного та математичного моделювання реального вузла тертя, а також методів математичної статистики при обробці та аналізі експериментальних даних, отриманих під час проведення лабораторних випробувань. Для вивчення змін структури та визначення глибини зміцненого шару використані металографічний метод та метод вимірювання твердості.

Адекватність математичної моделі та достовірність результатів досліджень підтверджується задовільною збіжністю даних, отриманих за теоретичних розрахунків, з результатами експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження проведено в лабораторних і виробничих умовах із використанням модельних зразків, методів планування експерименту та математичної статистики.

У результаті досліджень науково обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість удосконалення технології ремонту гільз гідроциліндрів автомобільно-тракторної техніки за рахунок застосування термомеханічного зміцнення їх робочої поверхні, що виготовляються із вуглецевих сталей, термомеханічним зміцненням робочої поверхні (порівняно з промисловим зразками).

Ключові слова: *техніко-експлуатаційні характеристики, гільза гідроциліндра, термомеханічне зміцнення, технологія, відновлення, автомобільно-тракторної техніки.*

S. V. LIASHENKO
PhD, Associate Professor,
Head of the Department of Agricultural Engineering
and Automobile Transport
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-3227-3738

A. O. KELEMESH
PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Agricultural Engineering
and Automobile Transport
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0001-9429-8570

O. A. BURLAKA
PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Agricultural Engineering
and Automobile Transport
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-2296-7234

V. V. LAVRENKO
Senior Lecturer at the Department of Agricultural Engineering
and Automobile Transport
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0009-0001-6145-9224

IMPROVEMENT OF THE TECHNICAL AND OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF HYDRAULIC CYLINDER LINERS OF AUTOMOTIVE AND TRACTOR MACHINERY BY APPLYING THERMOMECHANICAL STRENGTHENING TO ENHANCE THEIR RESTORATION TECHNOLOGY

Based on engineering methods, the technical and operational characteristics of hydraulic cylinders of automotive and tractor equipment have been improved by applying a combined technology of thermomechanical hardening of the working surface of the hydraulic cylinder sleeve. The analysis of traditional technologies has allowed us to identify their limitations and substantiate areas of improvement. The proposed process combines heating, deforming mechanical rolling and temperature tempering, for the implementation of which appropriate equipment and tools have been selected. Experimental studies have confirmed the effectiveness of the developed solutions: the deformation temperature (T_{def})*, the degree of deformation* (λ) *and the tempering temperature* ($T_{tempering}$) *of the surface, the distribution of hardness along the wall thickness, and after running-in – the amount of wear.*

The optimal thermomechanical hardening modes should be taken as: deformation temperature 850–880 ºC, deformation degree 14–18 % and tempering temperature 170–240 °C.

The proposed technology, compared to industrial production, provides:

– maintaining hardness at the level of 42–50 HRC with a more than twofold increase in plasticity;

– increasing the depth of the hardened layer by 1,25 times, which allows for repairs to repair dimensions;

– reducing the tension of the surface layer by 4–10 times;

– increasing the stability of mechanical properties, confirmed by reducing the coefficients of variation of hardness by 1,6–1,7 times and plasticity by 1,8–2,3 times.

A comparative analysis showed significant advantages of the new technology, in particular, increasing processing productivity by up to 4 times, reducing tool costs by three times, and reducing the overall cost of the process of restoring hydraulic cylinder liners. It was found that the use of the proposed technology provides hardening of the surface layer to a depth of up to 0,25 mm and achieving a roughness close to the operational one.

The purpose of the research is to increase the durability and reliability of hydraulic cylinder sleeves through the use of thermomechanical hardening, which will contribute to the improvement of the restoration processes of hydraulic systems of automobile and tractor equipment.

Object of research: hydraulic cylinder sleeve of automobile and tractor equipment, which is subject to wear in operating conditions and is subject to restoration using hardening technologies.

Subject of research: processes of thermomechanical hardening of the working surface of the hydraulic cylinder sleeve, which affect their durability, reliability and maintainability.

Research methods. The research was based on the use of methods of physical and mathematical modeling of a real friction unit, as well as methods of mathematical statistics in the processing and analysis of experimental data obtained during laboratory tests. To study changes in the structure and determine the depth of the hardened layer, the metallographic method and the hardness measurement method were used.

The adequacy of the mathematical model and the reliability of the research results are confirmed by the satisfactory convergence of the data obtained by theoretical calculations with the results of experimental studies.

Experimental studies were conducted in laboratory and production conditions using model samples, experimental planning methods and mathematical statistics.

As a result of the research, the possibility of improving the repair technology of hydraulic cylinder sleeves of automobile and tractor equipment through the use of thermomechanical strengthening of their working surface, made of carbon steels, by thermomechanical strengthening of the working surface (compared to industrial samples) was scientifically substantiated and experimentally confirmed.

Key words: *technical and operational characteristics, hydraulic cylinder sleeve, thermomechanical strengthening, technology, restoration, automobile and tractor equipment.*

Постановка проблеми

На сьогоднішній день реальний ресурс експлуатованих та відремонтованих гідроциліндрів автомобільно-тракторної техніки, є нижчим від встановленого чинним ДСТУ 3315-96 та ДСТУ 3317-96 на 30 %. Однією з причин цього є те, що існуючі способи ремонту гільз гідроциліндрів та відновлення їхньої робочої поверхні не забезпечують виконання всіх вимог, які висуваються до цієї деталі. Крім того, досвід ремонтного виробництва показує, що у переважній більшості випадків під час надходження гідроциліндра на капітальний ремонт гільзи гідроциліндрів вибраковуються через зношення робочої поверхні, що становить не більше 1 % від початкової маси деталі. При цьому ремонтопридатність зазначених деталей є досить низькою, а спосіб їх відновлення до ремонтного розміру або конструктивно не передбачений, або ж у багатьох випадках є недоцільним як з експлуатаційної, так і з економічної точки зору.

Відомо, що будь-який технологічний процес ремонту чи відновлення деталі (агрегату) передбачає не лише відновлення порушених у процесі експлуатації параметрів, а й, головним чином, стримування тих руйнівних процесів, які закономірно відбуваються у вузлах та його елементах [1]. Тому за сучасних умов, за наявності достатньої кількості способів відновлення деталей, актуальним завданням є пошук нових ефективних технологій зміцнення гільз гідроциліндрів. Таким технологічним процесом, на нашу думку, є поєднання в єдиному технологічному циклі термічного та механічного зміцнювального впливу на робочу поверхню стальних гільз циліндрів, тобто застосування високотемпературного термомеханічного зміцнення.

Таким чином, актуальність теми зумовлена, з одного боку, необхідністю впровадження нових технологій ремонту, що дають змогу підвищити ресурс і ремонтопридатність деталей автомобільно-тракторної техніки та ймовірною практичною значущістю переваг термомеханічного зміцнення робочої поверхні гільз гідроциліндрів, а з іншого боку – недостатнім обсягом науково-технічної інформації щодо впливу цього виду зміцнення на ефективність ремонтних процесів для деталей, виготовлених із вуглецевих сталей.

Наявність такої інформації дає змогу науково обґрунтувати параметри термомеханічного зміцнення гільз гідравлічних циліндрів автомобільно-тракторної техніки.

Крім того, наші дослідження можливо інтегрувати в загальну стратегію гармонійного розвитку сільського господарства в Україні, що направлена на модернізацію аграрного сектору: розвиток переробки, інновації, цифровізація та обмін знаннями [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз результатів досліджень показав, що поверхневе пластичне деформування (ППД) є одним із найбільш ефективних методів підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей в умовах граничного тертя [3]. Даний метод ґрунтується на використанні пластичних властивостей матеріалу та забезпечує усунення мікродефектів,

підвищення твердості, зносо- й корозійної стійкості, а також втомної міцності поверхні. Експериментальні дослідження показали, що застосування ППД знижує інтенсивність зношування у 1,5–2 рази, а мікротвердість поверхневого шару зростає на 18–27 % при товщині зміцненого шару 0,05–0,5 мм.

Важливою перевагою є можливість використання ППД як заключної технологічної операції як у серійному виробництві, так і в умовах ремонту. Разом з тим, ефективність процесу значною мірою залежить від точності попередньої обробки заготовки та параметрів інструмента, що деформує.

На нашу думку, можливо удосконалити технологію ремонту застосувавши термомеханічне зміцнення робочої поверхні гільз гідроциліндрів із вуглецевих сталей з метою підвищення ресурсу та покращення техніко-експлуатаційних характеристик. Встановлено, що визначальними технологічними параметрами цього процесу є температура деформації ($T_{деф}$), ступінь деформації (λ) та температура відпуску ($T_{відп}$), які істотно впливають на механічні й експлуатаційні властивості деталей.

Під час експлуатації гідроциліндрів робоча поверхня гільз піддається впливу робочої рідини та сил тертя поршня, що спричиняє гідроабразивне та абразивне зношення унаслідок неякісного очищення оливи або руйнування матеріалу гільзи, поршня та манжет. Деформації штока можуть призводити до зміщення поршня, неспіввісності та руйнування робочої поверхні, що зумовлює порушення герметичності та зниження працездатності гідроциліндра. Збільшення об'єму робочої порожнини гідроциліндра підвищує витрату оливи та знижує ККД [4]. Експлуатація гідроциліндрів під великими навантаженнями призводить до зміни геометричних розмірів корпусу, що зумовлює втрату герметичності ущільнень та зниження працездатності. Основними дефектами є зношення внутрішнього отвору гільзи, поверхонь штока і поршня, задири та риски (рис. 1), а також пошкодження різьбових з'єднань.

Дрібні дефекти усувають притиранням, значне зношення – механічною обробкою з подальшим хонінгуванням або шліфуванням.

Ремонт гідроциліндрів поділяють на поточний (заміна ущільнень, перевірка штока та гільзи, хромування штока) та капітальний (заміна гумово-технічних виробів, ремонт або заміна штока, хонінгування гільзи, ремонт поршня, направляючої та кріплень, заміна гільзи). Після ремонту обов'язковим є стендові випробування для контролю герметичності та працездатності пар тертя.



Рис. 1. Фото гідроабразивного та абразивного зношування внутрішньої поверхні гільзи гідроциліндра

Дослідження [5] показали, що зміцнення гільз гідроциліндрів методом ППД із нанесенням антифрикційного покриття є більш ефективним, ніж фосфатування, направлене хонінгування або алмазне вібровигладжування. Обробка гільз цим методом підвищує ресурс деталей у 1,9–2,6 рази, прискорює припрацювання пари «гільза – поршень» до 2 разів, знижує коефіцієнт тертя до 30 % та підвищує зносостійкість робочої поверхні у 1,8–5,0 разів.

Суттєвим недоліком цього методу є мала товщина антифрикційного шару (до 5 мкм), що в умовах абразивного зношування виявляється недостатньою і, як наслідок, може спричинити інші види зносу, знижуючи ресурс гільзи.

Дослідження [6] показали, що для більшості гільз гідроциліндрів застосовують загартування вуглецевих сталей високочастотними струмами (СВЧ), що дозволяє отримати мартенситну структуру робочої поверхні та підвищити її твердість до 40–50 HRC. Глибина загартованого шару становить 1,0–1,8 мм, що забезпечує можливість перешліфовки гільз гідроциліндрів під ремонтні розміри та підвищує ресурс деталей. Однак для більшості гільз гідроциліндрів ремонт із застосовуванням загартування вуглецевих сталей високочастотними струмами не передбачений, що зумовлює низьку ремонтопридатність. Загартування СВЧ може спричиняти короблення, утворення тріщин та неоднорідність структури, тому для кожного хімічного складу вуглецевих сталей підбирають оптимальні режими нагріву та охолодження.

Методи зміцнення та відновлення робочої поверхні гільз гідроциліндрів, як традиційні, так і альтернативні, покликані усувати дефекти, що виникають під час експлуатації, і, залежно від призначення та хімічного складу матеріалу, забезпечувати деталям властивості, які гарантують необхідний ресурс їх роботи. Проте, згідно з даними джерел [7], фактичний ресурс гідроциліндрів до капітального ремонту (включаючи застосування цих методів зміцнення та ремонту) у реальних умовах експлуатації значно поступається нормативним показникам. Тому розробка нових технологій зміцнення робочої поверхні гільзи гідроциліндра, спрямованих на підвищення їх ремонтопридатності, є об'єктивно необхідною і визначає актуальність даної теми.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є підвищення довговічності та надійності гільз гідроциліндрів за рахунок застосування термомеханічного зміцнення, що сприятиме вдосконаленню процесів відновлення гідравлічних систем автомобільно-тракторної техніки.

Завдання досліджень:

– провести аналіз науково-технічної літератури щодо оцінки ресурсу гільз гідроциліндрів, методів їх зміцнення та відновлення робочої поверхні;

– обґрунтувати можливість підвищення якості гільз гідроциліндрів із вуглецевих сталей шляхом термомеханічного зміцнення та визначити найбільш значущі технологічні фактори, що впливають на механічні й експлуатаційні характеристики деталей;

– проаналізувати зміни механічних властивостей (твердості та пластичності) поверхневого шару матеріалу після зміцнення та оцінити вплив оптимальних технологічних параметрів і властивостей зміцненої робочої поверхні на ресурс і ремонтопридатність гільзи гідроциліндра.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для проведення експерименту була використана частина технологічного процесу, що застосовується при виготовленні кілець кулькових підшипників [8]. Відповідно до експериментальної частини цієї роботи було задіяно наступне технологічне обладнання:

1) прямоточна газова піч – для нагрівання гільз гідроциліндрів до температури деформації;
2) вертикально-розточувальний верстат 2Е78П (рис. 2, *а*);
3) пристосування для центрування гільз гідроциліндрів на станині верстату (рис. 2, *б*);
4) пірометр – для визначення температури гільз гідроциліндрів у процесі нагрівання та перед деформуванням (точність вимірювання приладу ±10 °С);
5) ванна для гартування з водою та спеціальні захвати для гартування гільз гідроциліндрів;
6) муфельна лабораторна піч МП-2У – для відпуску гільз гідроциліндрів.



а б

Рис. 2. Технологічне обладнання: а) вертикально-розточувальний верстат 2Е78П; б) пристосування для центрування гільз гідроциліндрів на станині верстату

У якості дослідних зразків використовували заготовки у вигляді напівкілець вирізаних із гільзи гідроциліндра до і після проведення технологічного процесу термомеханічного зміцнення по внутрішньому діаметру.

Розміри заготовок були обумовлені технологічним оснащенням машини тертя МІ–1М (машина Амслера), що застосовується. Крім того, попередньо було проведено незначне переналагодження робочих органів та органів управління МІ–1М (машина Амслера) стосовно умов експерименту (відрегульовано органи управління для можливості створення зусилля деформації 4–7 кН).

Гільзу, що підлягала відновленню спочатку проточували під ремонтний розмір а перед деформуванням нагрівали протягом 8–10 хв у прямоточній газовій печі до інтервалу температур, зазначеного в табл. 1. Температура реєструвалася пірометром.



Рис. 3. Заготовки вирізані із стандартних гільз гідроциліндрів і розточених на ремонтний розмір (зразки справа) та вирізані із гільз гідроциліндрів відновлених за технологією термомеханічного зміцнення (зразки зліва)

Таблиця 1

Умови проведення експериментального термомеханічного зміцнення

Режимні параметри	Центральний композиційно ортогональний план (ЦКОП) другого порядку				
	рівні			Зіркові крапки	
	нижній	нульовий	верхній	$-d$	$+d$
Температура нагрівання, ºС	850–860	890–900	930–940	835–845	945–955
Температура деформації, ºС	830	870	910	815	925
Температура відпуску, ºС	50 (без відпуску)	200	350	без відпуску	400
Ступінь деформації, %	9	15	21	7	23

Інтервал часу між нагріванням у печі та деформацією з використанням вертикально-розточувального верстату 2Е78П, із встановленням на нього спеціальної головки із кульковим деформатором, становив 4–7 с (час, необхідний для витягування гільзи гідроциліндра з печі, установки її у пристосування для центрування гільз гідроциліндрів на станині верстату (рис. 2, *б*) та приведення в рух робочих органів верстату 2Е78П).

Температура гільзи гідроциліндра при деформуванні відповідала температурам, заданим умовами повного факторного експерименту і центрального ортогонального композиційного плану (ЦКОП) другого порядку (табл. 1). Зусилля деформації становило 5–6 кН.

Після цього гільза гідроциліндра гартувалася у воді. Інтервал часу між деформуванням гільзи гідроциліндра та переміщенням її у гартувальну ванну становив 5–10 с, що було необхідно для швидкого фіксування деформованого стану аустеніту та максимального переходу його в мартенсит, а також виключення можливості початку та (або) розвитку рекристалізаційних процесів.

З метою зменшення залишкових напружень після загартування та визначення оптимальних властивостей спеціальних вуглецевих сталей для гільзи циліндрів при використанні термомеханічного зміцнення, з гільзою протягом 60 хв проводили низькотемпературний відпуск у муфельній печі МП-2У. Температури відпуску наведено у табл. 1.

До необхідної чистоти внутрішньої поверхні гільзи гідроциліндрів доводилися за допомогою чистового шліфування (на внутрішньо шліфувальному верстаті) та хонінгування на промислових режимах. Шліфування було технологічно необхідне для надання необхідного розміру внутрішньої робочої поверхні (поверхні гільзи гідроциліндра які досліджуються та випробовуються).

В результаті експериментального термомеханічного зміцнення матеріалу за вище вказаною технологією вдалося забезпечити цілісність циліндричних гільз гідроциліндрів та їх геометричну форму.

Ступінь деформації гільз гідроциліндрів оцінювалася за величиною зміни внутрішнього діаметра:

$$\lambda = \frac{d_к - d_н}{d_н} \cdot 100\ \%, \qquad (1)$$

де $d_н$ – значення внутрішнього діаметра гільзи гідроциліндра до деформації, мм; $d_к$ – значення внутрішнього діаметра гільзи гідроциліндра після деформації, мм, мм.

Потім зі зміцнених циліндричних деталей на фрезерному верстаті вирізалися колодочки за розмірами, необхідними для установки на машину тертя.

Дослідження зносостійкості зміцненої поверхні виконували відповідно до вимог ДСТУ 2823–94. Документ регламентує оцінювання зносостійкості відновлених деталей рухомих спряжень шляхом випробувань зразків матеріалів і покриттів на спеціальних установках [9].

Отримані результати належать до порівняльних експрес-випробувань, що передбачають визначення співвідношення величини зношування відновленої та еталонної поверхонь за однакових умов, наближених до реальних, з використанням абразивно-масляної суспензії.

Експерименти проводилися у варіанті випробування відновленої поверхні за уніфікованими конструктивними параметрами та кінематичними характеристиками відповідно до нормативних документів і паспорта машини тертя.

Методика дослідження механічних якостей відновленої внутрішньої поверхні гільзи гідроциліндра методом термомеханічного зміцнення.

Для проведення дослідження використовувались наступні прилади:

1) прилад для вимірювання твердості HRC по Роквелу по ДСТУ 3870-99 моделі ТК-2М (рис. 4);
2) наконечник алмазний виду НК по ДСТУ 9378-93.

Встановлено, що характер розподілу об'єму матеріалу в зоні напливу визначається його механічними властивостями, насамперед здатністю деформуватися без руйнування. Метод базується на припущенні, що досліджуване середовище є ізотропним пружно-пластичним тілом, а зона пластичної деформації навколо відбитку індентора пропорційна показнику пластичності.



Рис. 4. Прилад для вимірювання твердості HRC по Роквелу

Співвідношення *t*/*d* (глибина відбитку до його діаметра) розглядається як характеристика пластичності, чутлива до змін структури матеріалу (див. рис. 5).

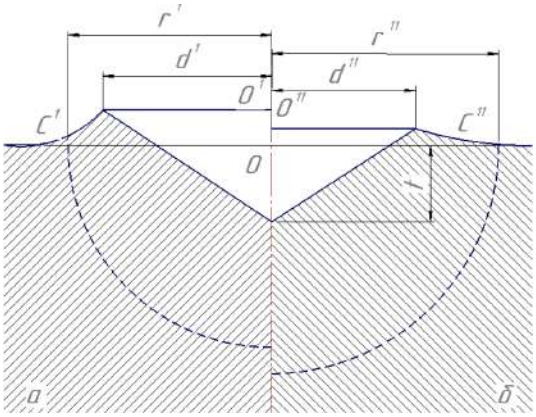


Рис. 5. Розповсюдження деформації і профіль відбитка при втисненні конічного індентора в метал з низькою (*а*) і високою (*б*) пластичністю

Особливістю підходу є визначення пластичності на основі двох незалежних параметрів (t і d), що знижує вплив твердості матеріалу та підвищує точність результатів. Це співвідношення може слугувати допоміжним інструментом для вивчення структурних змін у сплавах після термічної та термомеханічної обробки.

Параметр t/d є характеристикою, чутливою до змін у структурі сплаву, і може використовуватися як допоміжний інструмент для вивчення структурних перетворень, що відбуваються у сплавах під впливом термічної та термомеханічної обробок.

Як характеристику пластичності нами прийнято відносне подовження п'ятикратного розривного зразка, що відповідає моменту завершення деформування при максимальному зусиллі розтягу і визначається за формулою:

$$\delta_в = \frac{l_в - l_o}{l_o} \cdot 100\ \%, \qquad (2)$$

де: $\delta_в$ – відносне подовження, що відповідає закінченню деформування зразка при максимальному зусиллі розтягу P_{max}, %; $l_в$ – довжина розрахункової частини розривного зразка після завершення деформування при максимальному зусиллі розтягу, мм; l_o – початкова розрахункова довжина зразка до навантаження, мм.

Методика дослідження зносостійкості зміцненої поверхні. Для досліджень застосовували:

1. Машину тертя МІ–1М (Амслера). З метою випробування зразків і контрзразків нестандартних геометричних розмірів установка була модернізована: окремі вузли підняли над базовою плитою на різну висоту (рис. 6). При цьому всі експлуатаційні параметри машини та вимоги до проведення випробувань залишалися відповідними нормативам.



Рис. 6. Машина тертя МІ – 1М (машина Амслера)

2. Аналітичні ваги типу АДВ-200М (2 кл), що дозволяють зважувати з похибкою не більше 0,0001 г (рис. 7).



Рис. 7. Аналітичні ваги типу АДВ-200М

3. Зразки і контрзразки, виготовлені відповідно до креслень, приведених на рис. 3. Контрзразки виготовлені за єдиною технологією з однієї заготівки. Матеріал контрзразків – сталь 45 по ДСТУ 7809:2015, термооброблена до твердості 45–50 HRC.

4. Змащувальний матеріал – МГЕ-46В ДСТУ МГЕ-46В ISO VG – мінеральна гідравлічна олива для високонавантажених систем. Абразивний матеріал – продукти зношування матеріалу зразка.

5. Промивальні рідини – бензин (ДСТУ 7687:2015) і ацетон (ДСТУ 7259:2012).

Схема випробувань на зносостійкість приведена на рис. 8.

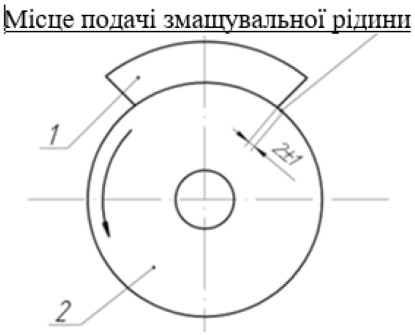


Рис. 8. Схема випробувань: 1 – зразок; 2 – контрзразок

Алгоритм проведення випробувань зносостійкості.

1. Встановлення зразка та контрзразка відповідно до схеми (рис. 8).
2. Постійна подача змащувальної рідини МГЕ-46В на контрзразок.
3. Приведення контрзразка в обертання; припрацювання поверхонь на шляху тертя 12–15 м до встановлення основного навантаження.
4. Навантаження зразка за допомогою системи МІ-1М відповідно 4–7 кН; проведення випробувань на шляху тертя 320 м (чотири періоди).
5. Визначення концентрації абразиву за величиною зношування протягом одного періоду.
6. Фіксація тривалості періоду електронним секундоміром.
7. Після кожного періоду: розвантаження системи, зняття зразків, промивання у спеціальних рідинах.
8. Огляд контрзразка (візуальний та за допомогою штангенциркуля) і зважування досліджуваного зразка.
9. Визначення загальної втрати маси (Δg) та середнього арифметичного значення втрати маси за період випробувань ($\Delta g_{ср}$).

В результаті дослідження механічних властивостей поверхневого шару вуглецевих сталей, підданих термомеханічному зміцненню, та обробки експериментальних даних згідно з методиками, були отримані такі значення твердості та параметра пластичності (див. діаграму на рис. 9).

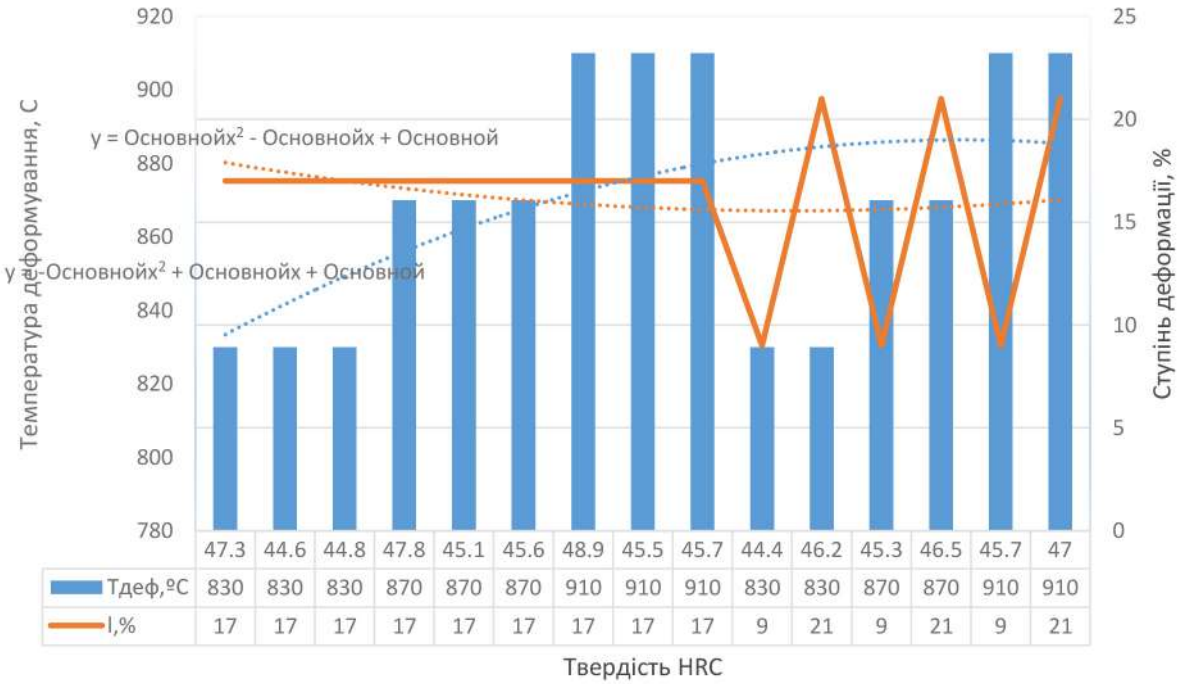


Рис. 9. Діаграма залежності твердості термомеханічно зміцненої внутрішньої поверхні гільзи гідроциліндра від температури деформації та ступеня деформації

Результати досліджень механічних властивостей поверхневого шару гільзи гідроциліндра виготовленої із вуглецевої сталі, підданої термомеханічному зміцненню, свідчать, що оптимальна твердість поверхні зразків (див. рис. 9 перетин ліній тренду) за температури 860–870 °С, та ступеню деформації в межах 16–18 % становить 45,6–46,5 HRC. Цей діапазон відповідає технічним умовам на виготовлення гільз гідроциліндрів, де нормативне значення твердості поверхневого шару становить 45 ± 3 HRC.

При порівнянні різних варіантів температур нагрівання термомеханічного зміцнення встановлено, що при приблизно однаковій твердості, яка знаходиться в межах одного порядку (45,6–46,5 HRC), спостерігається суттєве підвищення параметра пластичності. Так, значення параметра пластичності *t*/*d* для термомеханічно зміцнених зразків досягає 0,28–0,36, що у 2,0–3,6 рази перевищує показники зразків промислових гільз гідроциліндрів, де t/d становить 0,10–0,14.

Таке підвищення пластичності є наслідком оптимізації мікроструктури поверхневого шару при термомеханічному зміцненні. Процес включає попереднє нагрівання до температури 860–870 °С, наступне формування напливу та швидке охолодження у воді або маслі з швидкістю 50–100 °С/с, що забезпечує формування дрібнозернистої структури мартенситу з рівномірним розподілом вторинного цементиту. Внаслідок цього досягається поєднання високої твердості поверхні та підвищеної пластичності, що забезпечує збільшення зносостійкості та довговічності гільз гідроциліндрів у реальних експлуатаційних умовах.

Розрахункові значення загальної втрати маси $\sum\Delta g$ (г) були отримані з використанням інтегрованого пакета математичного моделювання MATLAB (версія 6.0) [10]. Масиви даних, отримані в результаті розрахунків, надали можливість проаналізувати значення загальної втрати маси зразків $\sum\Delta g$ за всіх можливих поєднань технологічних параметрів термомеханічного зміцнення та випробувальних навантажень. Це дозволило використати розрахункові дані для побудови необхідних графічних залежностей див. рис. 10.

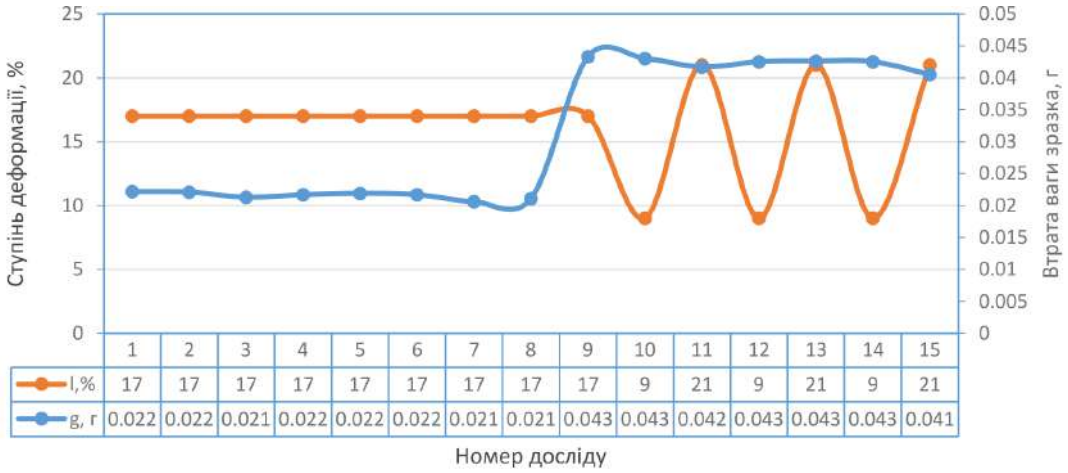


Рис. 10. Графіки зміни загальної втрати маси термомеханічно зміцненої внутрішньої поверхні гільзи гідроциліндра та ступеня деформації

Аналіз графіків (рис. 10) свідчить, що за однакових випробувальних навантажень найбільші значення загальної втрати маси $\sum\Delta g$ спостерігаються у зразків із промислових гільз, заводського виготовлення. Мінімальні значення $\sum\Delta g$ відповідають режиму термомеханічного зміцнення: температура деформації $T_{деф}$ = 870 ºС (рис. 10), ступінь деформації λ = 17 % (рис. 10), за температури відпуску $T_{відп}$ = 200 °С.

Слід відзначити, що мінімальні втрати маси $\sum\Delta g$ спостерігаються майже за всіх режимів термомеханічного зміцнення, які відповідають навантаженню *Рмі* = 450 Н (що в реальних умовах експлуатації відповідає тиску поршня на дзеркало гільзи гідроциліндра приблизно 1,0–1,5 МПа). Для зразків із промислових гільз гідроциліндрів максимальна зносостійкість спостерігається за випробувального навантаження *Рмі* = 500Н (≈1,2–1,8 МПа). Проте навіть за цієї величини навантаження на внутрішню поверхню гільзи гідроциліндра зміцненої за технологією термомеханічного зміцнення витримує вищі на 12–22 %.

Беручи до уваги дані графіків (рис. 10), що значення загальної втрати маси $\sum\Delta g$ = 0,021 г для зразків із гільз зміцнених термомеханічно були отримані експериментально на машині тертя та враховуючи значення ступеня деформації λ = 17 % (див рис. 10 точка перетину графіків), при випробувальному навантаженні *Рмі* = 450 Н встановлено, що вище згадані параметри режиму термомеханічного зміцнення відповідають температурі деформації $T_{деф}$ = 870 °С, за температури відпуску $T_{відп}$ = 200 °С.

Таким чином, запропонована технологія відновлення дозволяє удосконалювати технологічний процес покращення техніко-експлуатаційних характеристик гільз гідроциліндрів автомобільно-тракторної техніки шляхом термомеханічного зміцненням робочої поверхні (порівняно з промисловим зразками):

– поліпшити ремонтопридатність деталі за рахунок збільшення глибини зміцненого шару матеріалу до 2,5 мм, що дозволить використовувати відновлення гільз гідроциліндрів методом ремонтних розмірів;

– збільшити зносостійкість внутрішньої поверхні гільзи гідроциліндра на 18–22 %.

Запропонована технологія пройшла експериментальне лабораторне апробування та дозволить отримати річний економічний ефект від підвищення ресурсу та ремонтопридатності гільз гідроциліндрів при їх термомеханічному зміцненні порівняно з промисловим варіантом технології виготовлення.

Отримані результати науково обґрунтовані, статистично значущі, рекомендуються як базові дані при розробці та впровадженні технологій зміцнення в умовах сільськогосподарського виробництва. Крім того, за рахунок підвищення ремонтопридатності та середнього ресурсу гільз гідроциліндрів, реальним є зменшення витрати запасних частин, що дозволить знизити сумарні витрати на проведення їх відновлення та зменшити високий рівень попиту на запасні частини.

Висновки

Науково обґрунтовано та експериментально підтверджено доцільність удосконалення технології ремонту гільз гідроциліндрів автомобільно-тракторної техніки шляхом термомеханічного зміцнення робочої поверхні гільз із вуглецевих сталей, що підвищує їх ресурс та ремонтопридатність. Визначено ключові технологічні параметри процесу: температуру деформації, ступінь деформації та температуру відпустки.

Оптимальними режимами термомеханічного зміцнення встановлено: температуру деформації 850–880 ºС, ступінь деформації 14–18 % та температуру відпуску 170–240 °С.

Запропонована технологія порівняно з промисловим виробництвом забезпечує:

– збереження твердості на рівні 42–50 HRC при більш ніж дворазовому підвищенні пластичності;

– збільшення глибини зміцненого шару в 1,25 рази, що дозволяє проводити ремонт за ремонтними розмірами;

– зниження напруженості поверхневого шару у 4–10 разів;

– підвищення стабільності механічних властивостей, підтверджене зменшенням коефіцієнтів варіації твердості у 1,6–1,7 рази та пластичності – у 1,8–2,3 рази.

Список використаної літератури

1. Автухов А. К., Мартиненко О. Д., Тіхонов О. В., Бантковський В. А. Сервісна інженерія. Технічний сервіс в АПВ та ремонт машин [Електронний ресурс] : курс лекцій. Харків : ДБТУ, 2022. 135 с. – URL: https://www.scribd.com/document/834898753/Servisna-inzheneriya-22 (дата звернення 15.09.2025).

2. Про схвалення Стратегії розвитку сільського господарства та сільських територій в Україні на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025–2027 роках : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 15.11.2024 № 1163-р. *Офіційний вісник України*. 2024 р. № 108, стаття 6884, код акта 128839/2024.

3. Edalati K., Bachmaier A., Beloshenko V. A., Beygelzimer Y., Blank V. D., Botta W. J., Zhu X. Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances. *Materials Research Letters*. 2022. 10(4). P. 163–256. https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2029779

4. Kumar P., Park S., Zhang Y. A review of hydraulic cylinder faults, diagnostics, and prognostics. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2024. Vol. 11. P. 1637–1661. https://doi.org/10.1007/s40684-024-00639-3

5. Радик Д. Л., Купецький О.В. Технологічні аспекти динамічних методів поверхнево-пластичного деформування. Актуальні задачі сучасних технологій : матеріали XII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Тернопіль, 6–7 груд. 2023 р. Тернопіль, 2023. С. 58–59.

6. Devoino O. G., Vegera I. I., Zaleski V. G. About the Efficiency of Using Modern Technologies for the Formation of Hardened Coatings from Self-Fluxing Alloys in Combination of Gas Thermal Spraying and High-Frequency Current Melting. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2025. Vol. 61. P. 427–440. https://doi.org/10.3103/S1068375525700401

7. Shanbhag V. V., Meyer T. J. J., Caspers L. W., Schlanbusch R. Failure Monitoring and Predictive Maintenance of Hydraulic Cylinder – State-of-the-Art Review. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2021. Vol. 26, no. 6. P. 3087–3103. https://doi.org/10.1109/TMECH.2021.3053173

8. Wang H., Zhou Z. Research on the manufacturing of deep-groove ball bearing inner rings via the cold rolling of tube material. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 130. P. 739–753. https://doi.org/10.1007/s00170-023-12760-9

9. Savulyak V. I., Shylina O. P. Methods and means of researching the composition, structure and properties of materials. Educational manual : [Electronic resource]. Vinnytsia : VNTU, 2025. 64 p. – URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2025/Savulyak_2025_64.pdf (дата звернення 15.09.2025).

10. Півторак Д. О., Лазарєв Ю. Ф., Лакоза С. Л. Комп'ютерне моделювання процесів і систем. Практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 207 с. – URL: https://ela.kpi.ua/bitstreams/34a6e9ea-face-4e38-9e73-d98a367b302f/download (дата звернення 15.09.2025).

References

1. Avtukhov, A., Martynenko, O., Tikhonov, O., Bantkovsky, V. (2022). Service engineering. Technical service in automatic transmission and machine repair [Electronic resource]: course of lectures. Kharkiv : DBTU, 135. – URL: https://www.scribd.com/document/834898753/Servisna-inzheneriya-22 (access date 15.09.2025).
2. On approval of the Strategy for the Development of Agriculture and Rural Areas in Ukraine for the period until 2030 and approval of the operational plan of measures for its implementation in 2025-2027. (2024) (Ukraine). Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 15.11.2024, No. 1163-r. *Official Gazette of Ukraine*. No. 108, article 6884, act code 128839/2024.
3. Edalati, K., Bachmaier, A., Beloshenko, V., Beygelzimer, Y., Blank, V., Botta, W., Zhu, X. (2022). Nanomaterials by severe plastic deformation: review of historical developments and recent advances. *Materials Research Letters*. 10(4), 163–256. https://doi.org/10.1080/21663831.2022.2029779
4. Kumar, P., Park, S., Zhang, Y. (2024). A review of hydraulic cylinder faults, diagnostics, and prognostics. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. Vol. 11, 1637–1661. https://doi.org/10.1007/s40684-024-00639-3
5. Radik, D., Kupetsky, O. (2023). Technological aspects of dynamic methods of surface-plastic deformation. Actual Problems of Modern Technologies: materials of the XII International Scientific and Practical Conference, Ternopil, December 6–7, 2023. Ternopil, 58–59.
6. Devoino, O., Vegera, I., Zaleski, V. (2025). About the Efficiency of Using Modern Technologies for the Formation of Hardened Coatings from Self-Fluxing Alloys in Combination of Gas Thermal Spraying and High-Frequency Current Melting. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. Vol. 61, 427–440. https://doi.org/10.3103/S1068375525700401
7. Shanbhag, V., Meyer, T., Caspers, L., Schlanbusch, R. (2021). Failure Monitoring and Predictive Maintenance of Hydraulic Cylinder – State-of-the-Art Review. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. Vol. 26, no. 6, 3087–3103. https://doi.org/10.1109/TMECH.2021.3053173
8. Wang, H., Zhou, Z. (2024). Research on the manufacturing of deep-groove ball bearing inner rings via the cold rolling of tube material. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 130, 739–753. https://doi.org/10.1007/s00170-023-12760-9
9. Savulyak, V., Shylina, O. (2025). Methods and means of researching the composition, structure and properties of materials. Educational manual: [Electronic resource]. Vinnytsia : VNTU, 64. – URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2025/Savulyak_2025_64.pdf (access date 15.09.2025).
10. Pivtorak, D., Lazarev, Yu., Lakoza, S. (2021). Computer modeling of processes and systems. Workshop [Electronic resource]: training manual. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 207. – URL: https://ela.kpi.ua/bitstreams/34a6e9ea-face-4e38-9e73-d98a367b302f/download (access date 15.09.2025).

Дата першого надходження рукопису до видання: 17.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 621.762 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.21

О. В. ЛЯШКО
аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0007-5918-3832

В. М. ЛАЗОРИК
аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-2244-6815

І. А. СЄЛІВЕРСТОВ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0009-6135-8165

МЕХАНОХІМІЧНЕ ЛЕГУВАННЯ КОМПОЗИТНИХ ПОРОШКІВ AL-SI-HBN ДЛЯ НАНЕСЕННЯ УЩІЛЬНЮЮЧИХ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ

В роботі синтезовано порошки методом механохімічного легування алюмінію за хімічним складом, аналогічним композиційному порошку Oerlikon Metco (Metco 320NS). В основі композиційного порошку використовували промислові алюмінієві порошки двох типів, які отримують пульверизацією розплаву первинного алюмінію, з округлою та витягнутою формою.

Метою цього дослідження є отримання механохімічного легованого порошку Al за допомогою планетарного шарового кульового млина зі складом кремнію (8 %), нітриду бору (20 %) для отримання порошкових покриттів, нанесених методом плазмового напилення. Було оцінено вплив способу обробки порошку на хімічний склад, морфологію порошку та мікротвердість покриття. Характеристики порошків досягали шляхом їх змішування в кульовому млині протягом 2 годин у спиртовому середовищі. Обов'язковою умовою легування було використання герметичних барабанів, які обладнані патрубками подачі інертного газу. Легування проводилося в середовищі аргону для запобігання натікання вологи та кисню на активу поверхню порошків. Після легування порошки також демонтувались з барабану в захисному середовищі, для уникнення окиснення. Співвідношення маси кульок : маса порошку = 5 : 1–10 : 1, а діаметр сталевих кульок: 8–12 мм. Для підготовки гранул до плазмового напилення до отриманої суміші додавали 5 % бензиновий розчин синтетичного каучуку. Після змішування з пластифікатором суміш гранулювали шляхом протирання через сито з розміром комірок 50 мкм. Гранульовані порошки з метою видалення залишкової вологи сушили у вакуумній сушильній шафі за температури 70 °С протягом 3 год. Осадження композиційного порошку Al-Si-BN методом плазмового напилення було досягнуто за допомогою режиму генерації ламінарного плазмового струменя, що сприяло зменшенню окислення частинок порошку під час польоту. Сформовані покриття мали товщину до 500 мкм та мікротвердість 0,3 до 0,41 ГПа.

Ключові слова: *ущільнюючі покриття, плазмове напилення, композитні порошки механохімічне легування.*

O. V. LIASHKO
Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics, and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0007-5918-3832

V. M. LAZORYK
Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics, and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0003-2244-6815

I. A. SIELIVERSTOV
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation, Robotics, and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0009-6135-8165

© Ляшко О. В., Лазорик В. М., Сєліверстов І. А., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

MECHANOCHEMICAL ALLOYING OF AL-SI-HBN COMPOSITE POWDERS FOR APPLICATION OF SEALING PLASMA COATINGS

In this study, powders were synthesized by the method of mechanochemical alloying of aluminum with a chemical composition similar to that of the Oerlikon Metco composite powder (Metco 320NS). The composite powder was based on two types of industrial aluminum powders obtained by atomization of molten primary aluminum, differing in their morphology – spherical and elongated.

The aim of this study was to produce mechanochemical alloyed Al powder using a planetary ball mill with a composition of silicon (8 %), boron nitride (20 %) for the production of powder coatings applied by plasma spraying. The effect of the powder processing method on the chemical composition, powder morphology, and coating microhardness was evaluated. The characteristics of the powders were achieved by mixing them in a ball mill for 2 hours in an alcohol environment. A prerequisite for alloying was the use of sealed drums equipped with inert gas supply nozzles. The alloying was carried out in an argon environment to prevent moisture and oxygen from entering the active surface of the powders. After alloying, the powders were also removed from the drum in a protective environment to avoid oxidation. The ratio of mass of ball: mass of powder = 5 : 1–10 : 1, and the diameter of steel balls: 8–12 mm. To prepare the pellets for plasma sputtering, a 5 % gasoline solution of synthetic rubber was added to the resulting mixture. After mixing with the plasticizer, the mixture was granulated by rubbing it through a sieve with a 50 μm mesh. To remove residual moisture, the granular powders were dried in a vacuum drying oven at 70 °C for 3 h. The deposition of the Al-Si-BN composite powder by plasma spraying was achieved by using the laminar plasma jet generation mode, which helped to reduce the oxidation of powder particles during flight. The formed coatings had a thickness of up to 500 μm and a microhardness of 0.3 to 0.41 GPa.

Key words: *sealing coatings, plasma spraying, composite powders, mechanochemical alloying.*

Постановка проблеми

Розвиток авіаційного двигунобудування тісно пов'язаний із розв'язанням завдань щодо підвищення довговічності та продуктивності газотурбінних установок. Значною мірою вирішення цих завдань залежить від удосконалення систем герметизації турбомашин, де застосування спеціальних ущільнюючих покриттів дає змогу істотно знизити енергетичні втрати та підвищити ефективність роботи двигуна, що має вирішальне значення для авіаційної галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для створення ущільнювальних покриттів методом газотермічного напилення застосовують композиційні порошки, склад яких базується на концепції «метал – тверде мастило». Як металеві складові зазвичай використовуються нікель, сплави Ni та Co, а також AlSi, тоді як роль твердих мастил виконують графіт, гексагональний нітрид бору, бентоніт і поліестер. Саме поєднання цих компонентів визначає робочий температурний діапазон і відповідність умовам експлуатації турбін [1].

Для середньотемпературних ущільнювальних покриттів досить поширеними є такі композиції: алюміній з полімером, алюміній з нітридом бору, а також алюміній-бронза з полімерними порошками, зокрема Metco 601N або комбінація Al-бронза + поліестер (Metco 610NS). Інший підхід передбачає використання системи Al-Si з hBN, де наявність керамічної фази підвищує змащувальні властивості й термостійкість покриття (Metco 320NS) [2].

Методи механохімічного легування синтезу, такі як обробка в кульовому млині, розвинулись від лабораторного до промислового застосування [3]. Загалом, механохімія стає методом екологічно чистої технології, оскільки вона дозволяє уникнути використання (шкідливих) розчинників [4]. Крім того, механохімічні методи без розчинників особливо підходять для синтезу сплавів з високою ентропією, тобто матеріалів, що містять п'ять або більше елементів, оскільки це обходить проблеми розчинності. Тому механохімічний синтез ідеально підходить як метод скринінгу для нових, складних матеріалів [5]. Було встановлено, що механохімічне кульова обробка є простим шляхом твердотільного синтезу для створення легованих композиційних порошків. Так в роботі досліджено фізико-хімічні процеси, що відбуваються при формуванні частинок інтерметалідів заліза на основі Fe_3Al, легованих Cr, Zr, Mg, La та Ti, в умовах механохімічного синтезу. Встановлено, що процес синтезу легованих порошків протікає через низку послідовних стадій з формуванням твердих розчинів і завершується утворенням однофазних продуктів $Fe_3Al(Cr,Zr)$, $Fe_3Al(Mg)$, $Fe_3Al(Mg,La)$ та $(Fe,Ti)_3Al$ з нанодисперсною структурою. Порошки призначені для нанесення методами газотермічного напилення та електродугової металізації жаростійких FeAl-покриттів.

Формулювання мети дослідження

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить, що більшість композиційних порошків для газотермічного нанесення отримують енергоємними методами, зокрема за допомогою гідрометалургійного автоклавного процесу, отже пошук інших технологій для виробництва композиційних порошків є актуальною задачею.

Однією з таких технологій є технологія механохімічного легування композитних порошків для нанесення ущільнюючих плазмових покриттів.

Тому метою даної роботи є розробка енергозберігаючого методу механохімічного легування композиційного порошку, аналогу Metco 320NS для отримання ущільнюючих плазмових покриттів із необхідним комплексом властивостей для робочих поверхонь газотурбінних двигунів.

Викладення основного матеріалу дослідження

В якості основи композиційного порошку використовували промислові алюмінієві порошки двох типів, які отримують пульверизацією розплаву первинного алюмінію (чистота 99,8 %). Тип I має більш округлу форму близьку до сферичної з розміром –150 + 100 мкм. Частинки порошку типу II мають витягнуту довгасту форму, у деяких частинках відношення довжини до поперечного розміру більше п'яти. Для легуючих елементів застосовувались порошки Si (~1–5 мкм, чистота 97,5 %) та h-BN (~0,5–1 мкм, чистота 99,8 %).

Суміш порошків піддавалась механохімічної обробці у планетарному млині марки XQM – 2, загальний вид якого наведено на рис. 1.

Принцип роботи полягає в обертанні 4 барабанів відносно центральної осі і навколо власної осі в протилежну сторону обертання ротора млина. Барабани планетарного млина обертаються навколо власних осей і навколо осі «переносного обертання». При збільшенні швидкості подрібнення в розмельних барабанах збільшується відцентрова сила. Це досягається завдяки використанню спеціального планетарного редуктора, що забезпечує барабанам це специфічне обертання. Така схема дозволяє створювати перевантаження в десятки G, багаторазово збільшуючи ефективність подрібнювального устаткування і знижуючи енерговитрати на процес помелу.



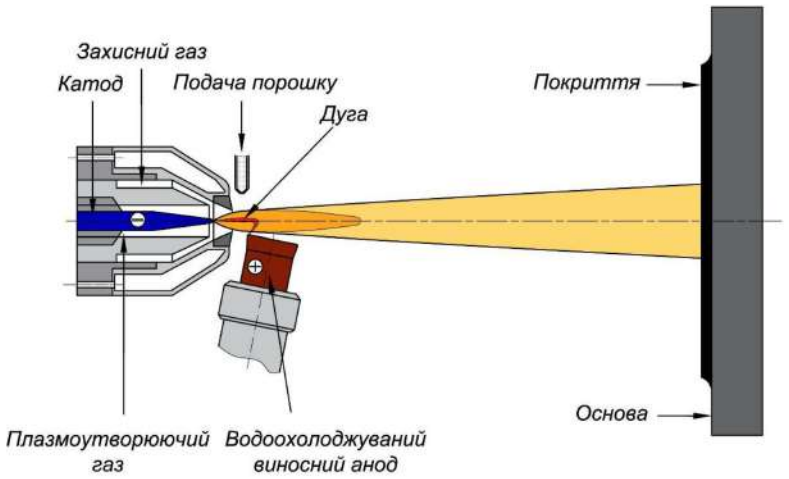
Рис. 1. Загальний вигляд планетарного кульового млину XQM–2

Обов'язковою умовою легування було використання герметичних барабанів, які обладнані патрубками подачі інертного газу. Попередньо з барабані відкачували повітря до тиску 1Па, а потім напускався аргон для запобігання натікання вологи та кисню на активу поверхню порошків. Після легування порошки також демонтуються з барабану в захисному середовищі, для уникнення окиснення. Співвідношення маси кульок : маса порошку = 5:1 – 10:1. Діаметр кульок: 8–12 мм (сталеві). Для інтенсифікації процесів легування та підвищення рівномірності розподілу легуючих елементів в алюмінієвій матриці в процес проводили в середовищі спирту.

Для підвищення ефективності легування ємкості завантажували кулі різного розміру, кулі ∅ 12 мм – 40 шт.; кулі ∅ 10 мм – 50 шт.; кулі ∅ 8 – мм 60 шт. Експериментально встановлено, що при частоті обертання ємностей 200 об/хв відбувається формування порошкової суміші з необхідними гранулометричним складом.. Для підготовки гранул до плазмового напилення до отриманої суміші додавали 5 % бензиновий розчин синтетичного каучуку. Після змішування з пластифікатором суміш гранулювали шляхом протирання через сито з розміром вічок 50 мкм. Гранульовані порошки з метою видалення залишкової вологи сушили у вакуумній сушильній шафі за температури 70 °С протягом 3 год.

Напилення порошку здійснювалося плазмовим методом в режимі генерації ламінарного плазмового струменя, що сприяло зменшенню окислення частинок порошку під час польоту. Ламінарна течія плазмового струменя забезпечувалася спеціально розробленою конструкцією електродугового плазмотрона, рис. 2 і технологічними режимами напилення.

У цьому плазмотроні, завдяки окремо виготовленому анодному блоку, дуга не стискалася, а плазмовий струмінь формувався шляхом обдування концентричними потоками обтискного і захисного газу аргону. Струм дуги встановлювався в межах 80–90 А, при напрузі 30–35 В, витрата порошку становила 4 кг/год при сумарній витраті



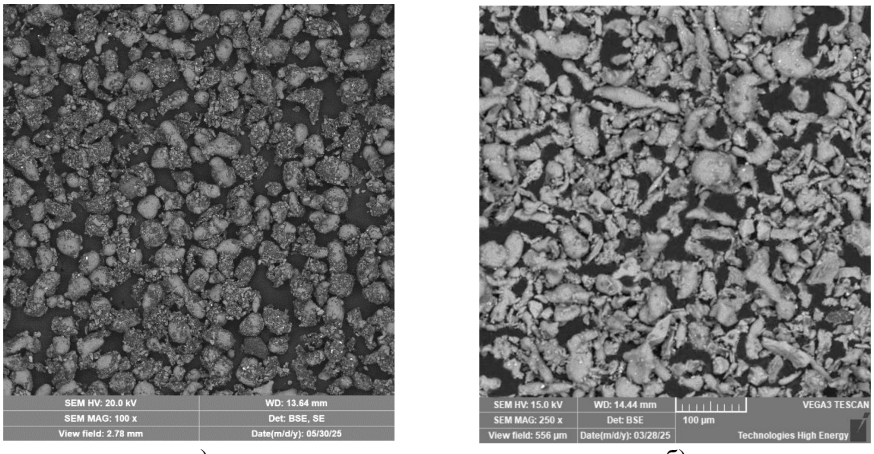
а



б

Рис. 2. Схема (а) і загальний вигляд (б) плазмового напилення ламінарним плазмовим струменем

плазмоутворюючого, транспортуючого і захисного газу (аргону) 5 л/хв. Завдяки таким конструктивним особливостям і технологічним режимам характер течії плазмового струменя був близький до ламінарного з числом Рейнольдса Re ≈ 300, що забезпечувало захист компонентів порошку від окислення і сприятливі умови для формування покриття.



а) б)

Рис. 3. Морфологія поверхні механіко-хімічно легованих алюмінієвих порошків: а) тип I; б) тип II

Підкладки для напилення були виготовлені з низьковуглецевої сталі, режим термообробки – відпуск, температура (840 ± 10) °С, охолодження на повітрі.

Характеристики порошків вимірювали за допомогою металографічного аналізу. Визначення хімічного складу покриттів, розподіл елементів і електронні знімки топографії поверхні здійснювали за допомогою скануючого електронного мікроскопа VEGA3 TESCAN. Мікротвердість покриттів визначали за Віккерсом, навантаження 0,548Н.

На рис. 3 показано морфологію поверхні порошків після механохімічного легування, структура і форма порошку алюмінію не зазнала суттєвих перетворень, на відміну від поверхні, яка щільно вкрита легуючими елементами.

Результатами енергодисперсійної спектроскопії показують (табл. 1, 2) що, елементний склад отриманих порошків приблизно відповідає необхідному хімічному складу заявленої композиції (Al-, Si – 8 %, hBN – 20 %), як для порошків I і II типу Склад визначали тільки по основним елементам (алюмінію, кремнію та кисню). Процес визначення кисню був напрямлений для встановлення міри окислення порошків в ході механохімічного легування, слід зазначити. в порошках типу II, підвищений вміст кисню може бути обумовлений менш компактною формою і більш розвиненою по верхньою. Також в порошках присутня незначна кількість магнію 0,34…0,44 %мас. (0,34…0,48 %atom.) та заліза 0,22..0,92 %мас. (0,1…0,41 %atom.), які потрапили до порошків разом з лігатурою.

Таблиця 1

Хімічний склад порошків типу I

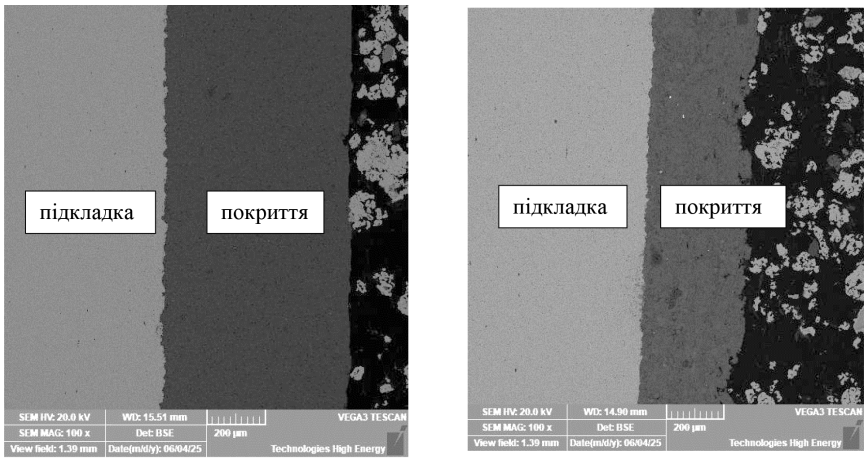
Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	abs. error [1 sigma]	rel. error [2 sigma]
O	8	888	0.98	0.92	1.45	1.17	23.56
Mg	12	982	0.56	0.44	0.48	0.07	12.92
Al	13	213922	117.09	92.14	89.89	5.62	4.80
Si	14	3634	8.17	6.28	8.08	0.23	5.61
Fe	26	160	0.28	0.22	0.10	0.07	24.50
		Sum	**127.09**	**100.00**	**100.00**		

Таблиця 2

Хімічний склад порошків типу II

Element	At. No.	Netto	Mass [%]	Mass Norm [%]	Atom [%]	abs. error [1 sigma]	rel. error [2 sigma]
O	8	3707	4.02	3.10	5.42	2.40	17.13
Mg	12	629	0.36	0.34	0.34	0.06	17.26
Al	13	154507	90.97	85.64	84.94	3.90	4.82
Si	14	11470	10.70	10.00	8.88	0.51	4.74
Fe	26	534	0.99	0.92	0.41	0.10	9.84
		Sum	**107.04**	**100.00**	**100.00**		

Після нанесення покриттів були проведені дослідження хімічного складу, пористості і твердості на перерізах покриттів (рис. 4).



а) б)

Рис. 4. Поперечні перерізи покриттів, виготовлених з порошків механіко-хімічного сплаву на сталевій основі: а) тип I; б) тип II

Товщина покриття I типу складає 500 ± 50 мкм (рис. 4, а), товщина покриття II складає 300 ± 50 мкм, що обумовлено гіршими характеристиками дозування порошку в плазмотроні і коефіцієнтом використання матеріалу (рис. 4, *б*).

Суттєво в покриттях відрізняються значення пористості і мікротвердості, що вимірювалося від поверхні до підкладки. В покритті з порошку I типу пористість складає 2,8 % рис. 5, *а*, а середнє значення мікротвердості 0,3ГПА рис. 7, *а*, в покритті з порошку II типу спостерігається зворотна залежність пористість дорівнює 9,5 % рис. 6, *а* середнє значення мікротвердості 0,41ГПА, рис 7, *б*. високе значення твердості покриттів з порошку II типу, обумовлене більш високою концентрацією оксидів, насамперед алюмінію

Висновки

В роботі був синтезований порошок зі складом 8 % Si, 20 % NB решта Al, що відповідає відомим аналогам для застосування для плазмового напилення ущільнюючих покриттів. Порошок був синтезований методом механохімічного легування в планетарному шаровому млині. В якості вихідного використовувався алюмінієвий порошок двох типів, округлої форми (I тип) і витягнутої (довгастої) форми (II тип). Отримані порошки були напилені плазмовим (APS) методом на низьковуглецеву сталеву підкладку.

В результаті дослідженні хімічного складу порошків було встановлена відповідність легуючих елементів, щодо існуючого композиційного порошку компанії Oerlikon Metco (Metco 320NS).

Таким чином, на основі отриманих даних з хімічного складу порошків і властивостей покриттів можна рекомендувати такі покриття для застосування в якості ущільнюючих для корпусів газотурбінних авіаційних двигунів. Більш конкретні рекомендації можна буде надати після проведення експлуатаційних випробувань отриманих покриттів на газо-абразивну та ерозійну стійкість.

Список використаної літератури

1. Wilson S. (2012). Overview of Sulzer Metco Thermally sprayed abradable coating technology for sealing in gas turbines. Proceedings of the 6th International Conference (Belgium, Brussels, October 17 – 18, 2012).

2. Metco O. (2015) Thermal Spray Materials Guide.

3. Colacino E., Isoni, V., Crawford, D., Garcia, F. (2021) Upscaling Mechanochemistry: Challenges and Opportunities for Sustainable Industry. *Trends in Chemistry* (*electronic journal*) vol. 3 no. 5, pp. 335–339. Retrieved from: https://doi.org/10.1016/j.trechm.2021.02.008

4. Friščić, T. (2010) New Opportunities for Materials Synthesis Using Mechanochemistry. *Journal of Materials Chemistry* (electronic journal) vol. 20 no. 36, pp. 7599–7605. Retrieved from: https://doi.org/10.1039/c0jm00872a

5. Szymanski, N. J., Rendy, B., Fei, Y., Kumar, R. E., He, T., Milsted, D., McDermott, M. J., Gallant,M., Cubuk, E. D., Merchant, A., Kim, H., Jain, A., Bartel, C. J., Persson, K., Zeng, Y., Ceder, G. (2023) An Autonomous Laboratory for the Accelerated Synthesis of Novel Materials. Nature (electronic journal) vol. 624 no. 7990, pp. 86–91. Retrieved from: https://doi.org/10.1038/s41586-023-06734-w

6. Borisov Yu. S., Borisova A. L., Burlachenko A. N., Tsymbalistaya T. V., Senderowski C. (2017) Structure and Properties of Alloyed Powders Based on Fe_3Al Intermetallic for Thermal Spraying Produced Using Mechanochemical Synthesis Method. The Paton Welding Journal, no. 9, pp. 33–39. doi.org/10.15407/tpwj2017.09.06

References

1. Wilson S. (2012). Overview of Sulzer Metco Thermally sprayed abradable coating technology for sealing in gas turbines. Proceedings of the 6th International Conference (Belgium, Brussels, October 17–18, 2012).

2. Metco O. (2015) Thermal Spray Materials Guide.

3. Colacino E., Isoni, V., Crawford, D., Garcia, F. (2021) Upscaling Mechanochemistry: Challenges and Opportunities for Sustainable Industry. *Trends in Chemistry* (*electronic journal*) vol. 3 no. 5, pp. 335–339. Retrieved from: https://doi.org/10.1016/j.trechm.2021.02.008

4. Friščić, T. (2010) New Opportunities for Materials Synthesis Using Mechanochemistry. *Journal of Materials Chemistry* (electronic journal) vol. 20 no. 36, pp. 7599–7605. Retrieved from: https://doi.org/10.1039/c0jm00872a

5. Szymanski, N. J., Rendy, B., Fei, Y., Kumar, R. E., He, T., Milsted, D., McDermott, M. J., Gallant,M., Cubuk, E. D., Merchant, A., Kim, H., Jain, A., Bartel, C. J., Persson, K., Zeng, Y., Ceder, G. (2023) An Autonomous Laboratory for the Accelerated Synthesis of Novel Materials. Nature (electronic journal) vol. 624 no. 7990, pp. 86–91. Retrieved from: https://doi.org/10.1038/s41586-023-06734-w

6. Borisov Yu. S., Borisova A. L., Burlachenko A. N., Tsymbalistaya T. V., Senderowski C. (2017) Structure and Properties of Alloyed Powders Based on Fe_3Al Intermetallic for Thermal Spraying Produced Using Mechanochemical Synthesis Method. The Paton Welding Journal, no. 9, pp. 33-39. doi.org/10.15407/tpwj2017.09.06

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 20.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 620.9 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.22

О. Є. МАЛЯРЕНКО
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
провідний науковий співробітник відділу прогнозування енергетичної ефективності
та перспективних паливно-енергетичних балансів
Інститут загальної енергетики Національної академії наук України
ORCID: 0000-0001-5882-916X

ТЕНДЕНЦІЇ ЗАМІЩЕННЯ ВИКОПНОГО ПАЛИВА АЛЬТЕРНАТИВНИМИ ВИДАМИ ТА ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ В УКРАЇНІ

Представлена стаття є систематичним оглядом публікацій українських вчених з найбільш відомих наукових академічних установ, що працюють у сфері енергоефективності, енергетичного аналізу, впровадження відновлюваних джерел енергії в енергетичному секторі економіки країни та промисловій енергетиці. Основною проблемою, що розглянута у публікації, є виділення напрямів скорочення споживання викопного палива для забезпечення взятих Україною міжнародних зобов'язань щодо зниження викидів в атмосферу парникових газів: використання універсального водовугільного палива, зрідженого вуглеводневого газу, біомаси (брикетів, пелетів, гранул, лушпиння зернових культур), зеленого водню, очищеного біогазу з полігонів твердих побутових відходів, палива,отр маного з відходів після їхнього сортування, синтетичного відновлюваного метану, біометану водня. Значного розвитку в Україні із врахуванням європейського досвіду набуває впровадження відновлюваних джерел енергії: сонця, вітру, термальної енергії, їхня комбінація між собою та з традиційними видами палива (генераторами на дизельному пальному або газопорневими установками, накопичувачами енергії). Також важливим фактором, що сприятиме скороченню споживання викопного палива є його обмежені ресурсні обсяги, що склались внаслідок військової агресії проти нашої країни. Це, зокрема стосується вугілля та природного і сланцевого газів. Шлях України до Європейського союзу також неможливий без дотримання європейських вимог щодо рівня енергетичної ефективності: впровадження когенераційних установок, термомодернізації будівель, зниження втрат енергоносіїв при їх транспортуванні. Всі ці проблеми можуть бути вирішені на основі українських або спільних міжнародних наукових розробок.

Ключові слова: *викопне паливо, альтернативне паливо, відновлювані джерела енергії, енергоефективність, викиди парикових газів.*

O. YE. MALIARENKO
Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
Leading Researcher at the Department for Energy Efficiency
and Energy Balances Forecasting
General Energy Institute of National Academy of Scieces of Ukraine
ORCID: 0000-0001-5882-916X

TRENDS IN REPLACEMENT OF FOSSIL FUEL WITH ALTERNATIVE AND RENEWABLE ENERGY SOURCES IN UKRAINE

The presented article is a systematic review of publications by Ukrainian scientists from the most famous scientific academic institutions working in the field of energy efficiency, energy analysis, implementation of renewable energy sources in the energy sector of the country's economy and industrial energy. The main problem considered in the publication is the identification of areas for reducing fossil fuel consumption to ensure Ukraine's international commitments to reduce greenhouse gas emissions into the atmosphere: the use of universal hydrocoal fuel, liquefied hydrocarbon gas, biomass (briquettes, pellets, granules, grain husks), green hydrogen, purified biogas from solid waste landfills, fuel obtained from waste after its sorting, synthetic renewable methane, biomethane hydrogen. Significant development in Ukraine, taking into account European experience, is the introduction of renewable energy sources: solar, wind, thermal energy, their combination with each other and with traditional fuels (diesel generators or gas-fired plants, energy storage devices). Also an important factor that will contribute to reducing fossil fuel consumption is its limited resource volumes, which have formed as a result of military aggression against our country. This applies in particular to coal and natural and shale gases. Ukraine's path to the European Union is also impossible without compliance with European requirements for the level of energy efficiency: the introduction of cogeneration plants, thermal modernization of buildings, reducing energy losses during their transportation. All these problems can be solved on the basis of Ukrainian or joint international scientific developments.

Key words: *fossil fuels, alternative fuels, renewable energy sources, energy efficiency, greenhouse gas emissions.*

© Маляренко О. Є., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Постановка проблеми

Національний план з енергетики та клімату на період до 2030 року [1] визначає ключові цілі для України до 2030 р., а саме скорочення викидів парникових газів на 65 % порівняно із 1990 р., досягнення частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у структурі валового кінцевого енергоспоживання не менше ніж на 27 %, обсяг споживання первинного палива не більше 72,2 млн т н.е., кінцевого споживання – 42,2 млн т н.е. Згідно з Директивою Європейського парламенту і ради ЄС 2018/2001 від 11.12.2018 про стимулювання використання енергії з відновлюваних джерел (нова редакція) [2] держави-члени ЄС повинні забезпечити певну частку енергії з відновлюваних джерел у валовому кінцевому споживанні енергії до 2020 р. згідно з Додатком 1. Ця частка для різних країн-членів ЄС коливається від 10 % (Мальта) до 49 % (Швеція) [2]. Відповідно до цілей ЄС, до 2030 року 42 % всієї енергії має надходити з відновлюваних джерел, а 14 % енергії у транспорті повинно походити з них, зокрема 3,5 % – з біопалива та біогазу. Крім того, ЄС планує щорічно виробляти 35 млрд кубометрів біометану, що зможе замінити до 20 % імпортованого раніше природного газу та сприятиме енергетичній незалежності [3, 4. Для виконання поставлених задач необхідно розглянути існуючі в Україні технології заміщення викопного палива для подальшої оцінки обсягів його прогнозного споживання по країні для забезпечення ключових секторів економіки: енергетики, промисловості, сільського господарства, надання комунальних послуг населенню та ін.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є систематичний огляд літературних джерел щодо впроваджених в Україні технологічних напрямів, що забезпечать скорочення споживання, у першу чергу, вугілля та іншого викопного палива.

Ця стаття охоплює аналіз публікацій українських наукових видань, що індексуються у міжнародній наукометричній базі Скопус: «Енерготехнології та ресурсозбереження», «Відновлювана енергетика» та фахових видань: «Теплофізика та теплоенергетика», «Енергетика: економіка, технології, екологія», «Системні дослідження в енергетиці» за останні 5 років. Із проаналізованих статей виділено ті, що описують технології, які сприяють скороченню споживання вуглецеємних видів палива.

Викладення основного матеріалу дослідження

Перспективне альтернативне паливо

Пошук та освоєння альтернативних джерел енергії як замінника дефіцитних вугілля і природного газу є надзвичайно важливою для економіки України задачею.

В Україні, в Інституті технічної теплофізики НАН України сумісно із Національним університетом харчових технологій розроблено технологію та теплообмінне обладнання для виготовлення універсального водовугільного палива (УВВП), що може бути застосовано в усіх типах теплоенергетичних установок. Застосування УВВП як енергетичного палива було випробувано для котла КВТС-20 та показало такі позитивні результати: збільшення теплової потужності котла з 13,2 до 21,1 МВт при заміні 70 % вугілля водовугільним паливом, підвищення ККД котла з 78,8 до 84,0 %, зниження виходу шлаку в 1,7–2,0 рази та зменшення горючих у шлаку з 35–38 до 13–15 % [5, 6].

Для зменшення споживання вугілля на ТЕЦ Інститутом теплоенергетичних технологій НАН України запропоновано використання зрідженого вуглеводневого газу як резервного та альтернативного палива на вугільних ТЕЦ у випадку пошкодження підвідних газових мереж, які забезпечують надійне та економічне живлення вугільного котлоагрегату синтетичним природним газом у різних режимах: підсвічування та розпал або аварійна робота на навантаженні 25 % з можливістю переходу з природного газу на зріджений вуглеводневий газ та навпаки [7].

Досвід використання біомаси у газомазутних котлах ТЕЦ цукрових заводів розглянуто у статті Чернявського М. В. і співавторів [8]. Реконструкція котлів за розробленими технічними рішеннями можлива для виконання в проміжок між виробничими сезонами. Її реалізація на котлах БКЗ-75 ГМА Радехівського та Чортківського цукрових заводів дала можливість досягти прийнятних техніко-економічних та екологічних показників, забезпечила окупність за рахунок різниці комерційних цін газу та пелет з агробіомаси. Цей досвід є важливим при створенні децентралізованих регулюючих потужностей теплової генерації України.

У роботі Кудрі С. О. та співавторів [9] представлено результати теоретичних і прикладних досліджень та практичного доробку вітчизняних вчених у галузі зеленої водневої енергетики. Завдяки екологічним перевагам водневих технологій їх широке застосування є одним із перспективних сучасних напрямів декарбонізації світової енергетики. Досліджувались різні форми зберігання і транспортування водню та визначались найприйнятніші методи акумулювання з урахуванням подальшого його використання в енергосистемах на основі ВДЕ: спалювання з отриманням теплової енергії, перетворення в електричну енергію в мотор-генераторах і паливних елементах, використання паливних сумішей з бензином в автотранспорті. У результаті спільної роботи творчих колективів данських і українських вчених за договором між Фолькецентром (Данія) та Інститутом електродинаміки НАН України від 1990 року на основі науково-технічних рішень з отримання водню від ВДЕ, його зберігання і подальшого перетворення в електричну і теплову енергію та використання як палива в автотранспортних засобах, створено першу в Європі вітроводневу станцію. Результати її подальших випробувань стали реальною основою для розвитку сучасної екологічно чистої галузі водневої енергетики.

У публікації Іванова Ю. А. та співавторів [10] запропоновано комплексну технологію утилізації біогазу полігонів твердих побутових відходів для виробництва енергоносіїв. Наявність у складі біогазу полігону твердих побутових відходів діоксиду вуглецю як негорючої домішки та підсмоктування навколишнього повітря в товщу відходів полігону, а отже й потрапляння його в звалищний газ, суттєво знижує в ньому концентрацію метану, що впливає на забезпечення ефективної роботи газопоршневого двигуна електростанції та на зниження обсягів генерації електроенергії. Видалення діоксиду вуглецю з біогазу дає можливість одночасно підвищити в ньому концентрацію метану на вході в тепловий двигун, що сприяє стабільній та ефективній роботі газопоршневого двигуна електростанції та збільшенню обсягів генерування електроенергії в результаті енергетичної утилізації звалищного газу. Застосування комплексної технології утилізації біогазу в режимі когенерації дає можливість одержати не тільки електроенергію, а також тепло, яке можна використати в абсорбційних амінових технологіях вилучення CO_2 з біогазу, таким чином знижуючи викиди діоксиду вуглецю в атмосферу.

Метанування, тобто реакція перетворення вуглекислого газу та водню з одержанням синтетичного відновлюваного метану, є одним із напрямків вирішення задачі заміщення дефіцитного викопного палива, що розглянута у публікації Клименка В.М. та співавтора [11]. У цій статті досліджено напрями та особливості технологій метанування, які реалізуються сьогодні у світі, описано структурну схему та одержання компонентів технології біологічного метанування, розглянуто дві концепції біометанування: in-situ та ex-situ. Перша у порівнянні з другою є значно дешевшою та простішою у виконанні, але поки що складнішою у реалізації процесу метанування. Актуальність впровадження технологій метанування в Україні обумовлена активним розвитком та впровадженням біоенергетичних технологій з використанням існуючих в країні великих біоресурсів. Налагодження виробництва біометану та синтетичного відновлюваного метану сприятиме вирішенню таких актуальних задач, як акумулювання нестабільної електроенергії від сонячних та вітрових електростанцій, захист навколишнього середовище від викидів CO_2, перетворюючи його з парникового газу на паливо.

У публікації Домбровського О. Г. та співавторів [3] розглянуто перспективні технології біометанування водню in-situ для біологічного очищення біогазу від вуглекислого газу. Дослідження показують, що пряме введення водню в анаеробні реактори дозволяє підвищити вміст метану в біогазі на 10–20 %, що покращує його енергетичну цінність. Крім того, цей процес сприяє зниженню викидів CO_2 на 20–30 %, що робить технологію екологічно безпечнішою. Окрім екологічної вигоди, зниження експлуатаційних витрат на 15–25 % порівняно з фізико-хімічними методами робить біометанування in-situ економічно ефективним рішенням [12]. Технології біометанування водню in-situ становлять значний потенціал для досягнення цілей сталого розвитку, зменшення вуглецевого сліду та забезпечення стабільного біометанового потоку в секторі відновлюваної енергетики. Цей процес не лише допомагає зменшити кількість відходів, але й забезпечує екологічно чисте джерело енергії, що відповідає сучасним вимогам до сталого розвитку [3, 13].

У публікації Мікульонка І. О. [14] розглянуто основні види пресованого твердого біопалива: брикети і пелети. Виконано критичний аналіз інноваційних методів одержання біопаливних брикетів та пелет, а також показано можливість утилізувати різні види побутових та промислових відходів, використовуючи їх як альтернативне паливо.

Важливим напрямом економії викопного палива є безумовно підвищення енергетичної ефективності його використання із впровадженням когенераційних установок, що є давно відомим, але мало впровадженим в Україні заходом. Прийнятий Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 р. як раз виділяє європейський принцип “Energy efficiency fist” [15]. Цей державний документ визначає напрями підвищення енергетичної ефективності: виробництво біогазу з твердих побутових відходів, енергоефективні будівлі, у т.ч. шляхом проведення термомодернізації, ефективне опалення будівель шляхом встановлення сонячних нагрівачів, теплонасосних установок, збільшення частки когенерації, запровадження ефективного зовнішнього освітлення у населених пунктах, скорочення втрат в мережах передачі електроенергії, заходи з енергоефективності у промисловості: чорна металургія, харчова, гірничодобувна, виробництво неметалевих виробів, збільшення частки електротранспорту (електрика з ВДЕ), сортування та перероблення відходів.

Використання відновлюваних джерел енергії

Аналіз часток відновлюваних джерел енергії у валовому кінцевому споживанні енергії європейських країн досліджено у статті Мисака С. Й. та співавторів [16]. Дослідження охоплює такі види відновлюваних джерел енергії, як сонячна енергія загалом, сонячна теплова енергія, сонячна електроенергія, біомаса, біопаливо, відходи, вітрова енергія, геотермальна енергія, гідроенергія та енергія теплових насосів. Аналіз виконано для Нідерландів, Німеччини, Франції, Польщі та України. Досліджено фактичні дані щодо використання відновлюваних джерел енергії в країнах та проаналізовано плани цих країн щодо подальшого збільшення їх використання. Зібрані графічні дані відображають реальні досягнення країн щодо використання відновлюваних джерел енергії, а також наміри та плани на майбутнє. Результати аналізу важливі для розуміння тенденцій розвитку відновлюваної енергетики в Європі та можуть бути прикладом для інших країн, зокрема України.

У статті Бондаренко Д. [17] досліджено процеси перетворення енергії сонячного випромінювання на електричну і теплову енергії. В роботі показано, що не весь спектр електромагнітного випромінювання Сонця

перетворюється в напівпровідниковому перетворювачі на електричну енергію. Значна частина сонячного випромінювання перетворюється на теплову енергію.

У публікації Ференц В. І. [18] розглянуто нову технологію у сільському господарстві - агровольтаїку, що поєднує виробництво сонячної енергії з вирощуванням агрокультур. У статті йдеться про перспективи для сучасного сільського господарства, яке стикається з викликами кліматичних змін та зростаючих змін в енергоефективності. Технологія Agri-PV (агрофотовольтаїка) передбачає покращення показника ефективності використання площі земної поверхні агропромислового сектору за рахунок синергетичного поєднання установок відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та сільськогосподарського виробництва. Мається на увазі встановлення фотоелектричних панелей на певній висоті, залежно від виду вирощуваної культури, над полями сільськогосподарських угідь. У Європі ця технологія використовується від ферм до яблуневих садів, збільшується ефективність використання земельних ресурсів, зменшуються водні витрати та підвищується загальну продуктивність. Крім того, стаття розглядає цілі Спільної сільськогосподарської політики ЄС, які спрямовані на підвищення продуктивності сільськогосподарського виробництва, збереження довкілля та запобігання змінам клімату.

У публікації Кузнєцова М. П. та співавтора [19] досліджено можливості забезпечення локального споживача електроенергією з відновлюваних джерел для зменшення залежності від централізованого постачання. Особливістю задачі є вплив випадкової природи відновлюваної енергетики та споживання на можливості забезпечення енергетичного балансу в локальній енергосистемі, що потребує вибору складу та потужностей відновлюваної генерації й допоміжного обладнання. Як допоміжне балансувальне обладнання розглядаються акумуляторна батарея та генератор на традиційному паливі. Комбінування джерел вітрової та сонячної енергії дозволяє зменшити залежність від загальної електромережі. Такий самий результат забезпечує застосування проміжних акумуляторів енергії та допоміжного джерела типу дизельгенератора.

Перспективним напрямом розвитку ВДЕ є комбінування вітрової енергії із воднем. Цьому присвячена стаття Кудрі С. О. та співавторів [20]. Проблематика розвитку вітроводневої енергетики України полягає в необхідності створення ефективної водневої інфраструктури – систем виробництва, акумулювання, зберігання, транспортування та перетворення водню на енергію необхідної якості. Застосування водневих технологій дає змогу оптимізувати вітроенергетичну систему та досягти більшої економічної ефективності за рахунок використання надлишкової енергії, зниження втрат від вимушених зупинок вітроелектричного обладнання, оскільки забезпечується неперервність роботи генерувальної системи. Особливо привабливим є масштабне виробництво електролітичного водню за допомогою офшорної вітрової енергії. Повоєнний розвиток вітроводневої енергетики забезпечить зміну структури паливно-енергетичного комплексу України шляхом збільшення в ньому вітрової енергії, підвищення стабільності роботи вітроелектричного обладнання, ефективності та надійності електропостачання, а також матиме позитивний вплив на довкілля.

Перспективним напрямом розвитку безвуглецевого теплозабезпечення є застосування теплових насосів в системах теплопостачання [21, 22]. Ці технології розповсюджено в Європі, зокрема в Німеччині та Польщі [21], є дуже перспективними, сприяють економії викопного палива (газу, вугілля) та мазуту. Регіональний потенціал застосування теплонасосних технологій для 24 областей України наведено у публікації Дерія В. О. та співавторів [22]. Застосування теплонасосних технологій у тваринницькому комплексі було розглянуто у публікації Дзюбана Ю. І. та співавторів [23]. Крайня публікація описує досвід впровадження ТНУ, який сприяв суттєвій економії електроенергії порівняно із використанням на молочній фермі електрокотла.

До актуальних питань комплексного використання ВДЕ можна віднести наступні: законодавче поле, організаційні заходи; досягнення енергетичної ефективності, енергетичний менеджмент; потреби в балансуванні енергетичних систем з високою часткою відновлюваної генерації; математичне забезпечення задач з оцінки можливостей відновлюваної енергетики; врахування особливостей споживання енергії; технічні особливості роботи комбінованих енергосистем; взаємодія науки та промисловості під час впровадження інноваційних розробок [24]. Розвиток законодавства ЄС у сфері відновлюваної енергетики [25] передбачає нові цілі щодо використання ВДЕ: у кінцевому споживанні енергії до 2030 року ВДЕ мають досягти частки в 32 %. Ця ціль вища на 20 % за попередню ціль, встановлену початковою директивою RED. Передбачено збільшення використання біопалива в транспортній сфері: його частка має становити принаймні 14 %. Директива RED II запроваджує суворіші критерії сталості для біопалива та інших джерел біоенергії. RED II містить такі положення, як вимога до держав-членів проводити енергоаудит на великих підприємствах, висуваються нові вимоги до звітності для держав-членів і Комісії для моніторингу прогресу в досягненні цілей, встановлених у директиві. Очікується, що ці зміни допоможуть ЄС досягти кліматичних та енергетичних цілей, а також сприятимуть сталому економічному зростанню та створенню робочих місць у секторі відновлюваної енергетики. Звичайно, сучасні вітчизняні реалії потребують особливого підходу [26], оскільки регулювання цієї сфери в умовах війни потребує особливої уваги, а виробники мають отримувати підтримку з боки держави задля розвитку ринку «зеленої» енергетики. Серед організаційних заходів підкреслено роль нормативного врегулювання відновлюваної енергетики. Стосовно трендів європейської енергетичної політики зазначено [27], що відповідно до звіту Європейської Комісії за 2022 рік з травня по серпень 2022 року ЄС забезпечив рекордні 12 % своєї електроенергії від сонячної енергетики та 13 % з вітроенергетики. В опублікованій

робочій програмі на 2023−2024 роки простежуються декілька основних трендів у галузі відновлюваної енергетики. Однією з тенденцій є приділення значної уваги так званим проривним технологіям, які дозволять перейти на якісно новий рівень використання ВДЕ. У вітчизняній енергетичній політиці набуває ваги впровадження систем енергетичного менеджменту [28], зокрема з урахуванням вимог міжнародного стандарту ISO 50001:2018. Попередня оцінка наявного потенціалу енергозбереження малих та середніх підприємств дозволила виявити наявність 20−30 % можливих заощаджень у разі проведення регулярної системної роботи у сфері енергоефективності за вимогами стандарту. Звичайно, якісний менеджмент потребує новітнього технічного забезпечення [29]. В основу пропонованого програмно-технічного забезпечення систем управління електроспоживанням покладені принципи енергетичного менеджменту в реальному часі з використанням сучасних інформаційних технологій. Такий підхід характеризується узгодженням попиту і пропозиції в мікромережі з декількома джерелами, коли баланс між власною генерацією і споживанням формується на основі забезпечення максимальної частки відновлюваних джерел в енергобалансі. Поряд з технічними заходами має бути нормативне забезпечення надійності електропостачання з ВДЕ [30]. Важливим кроком до забезпечення стабільності енергопостачання, крім зазначених, є комплексний підхід до балансування генерації та споживання. Це, зокрема, і керований попит на електроенергію, тобто адаптація потреб до можливостей ВДЕ [31, 32]. Як фактори, що впливають на споживання, зазвичай вказують погодні умови, зокрема середню помісячну температуру, тривалість світлового дня. Для закладів освіти важливою є кількість осіб у закладі. Вибрані фактори, які можуть впливати на енергоспоживання, є найдоступнішими. Врахування цих факторів дозволяє оптимізувати комплекс засобів постачання енергії, особливо ВДЕ. Істотну роль відіграє й розумне керування електричною мережею [33, 34] з використанням систем автоматики (АСКОЕ, АСУТП тощо). Зазначено існування специфічних потреб споживача до якості енергозабезпечення [35]. Підвищені вимоги до надійності додають певні обмеження, які змушують або завжди використовувати загальну енергомережу та відмовитись від автономності, або використовувати власні джерела енергії, розраховані на постійну роботу, як основне джерело (якщо потрібно створити автономну систему на базі ВДЕ з акумуляторами або резервними генераторами). Серед напрямів, що стосуються безпосередньо комплексного використання ВДЕ, можна зазначити наступні [24]:

– раціональне розташування енергетичних потужностей з урахуванням можливостей розосередженої генерації, стійких комбінованих локальних енергосистем з відновлюваними джерелами різної природи;

– узгодження темпів впровадження відновлюваної енергетики та регулювальних можливостей енергосистеми, зокрема впровадження систем накопичення енергії, прогнозування та керованого навантаження;

– використання енергоефективних технологій в енергетиці, комунальному господарстві й на транспорті, стійких до негативних зовнішніх впливів;

– вдосконалення нормативно-правової, сертифікаційної та метрологічної бази.

У публікації Кармазіна О. О. та співавтора [36] розглянуто законодавчі пропозиції ЄС щодо досягнення цілей Паризької угоди щодо зміни клімату та скорочення викидів парникових газів (ПГ) на 55 % до 2030 р. відносно 1990 р. Запропоновано перегляд Директиви RED II та прийняття в подальшому нової директиви RED III, яка має визначати міжгалузеві цілі та заходи, спрямовані на ефективне використання потенціалу економічно ефективних відновлюваних джерел енергії в усіх секторах енергетичної системи. Передбачено вищі цільові показники у секторах електроенергетики, будівництва й транспорту, а також у промисловості та для високоефективного централізованого опалення й охолодження. Європейська Комісія (ЄК) представила стратегію REPowerEU як відповідь на проблеми та виклики, що виникли на світовому енергетичному ринку через повномасштабне вторгнення росії в Україну. ЄК пропонує збільшити цільовий показник енергоефективності від 9 до 13 % в межах пакета європейського законодавства «Fit for 55». Комісія висуває пропозицію збільшити цільовий показник відновлюваних джерел енергії до 45 % (попередній показник 32 %) від загального обсягу до 2030 року в межах пакета. Встановлення цієї загальної та амбітної цілі є основою для реалізації інших ініціатив [37, 38], зокрема запровадження правового зобов'язання встановлювати сонячні панелі на нових громадських та комерційних будівлях і на нових житлових будинках, подвоєння швидкості запровадження теплових насосів і заходів з інтеграції геотермальної та сонячної теплової енергії в модернізовані системи централізованого і комунального опалення, державами-членами мають бути запроваджені спеціальні зони для відновлюваних джерел енергії зі скороченням та спрощенням дозвільних процесів. Встановлення цілі в 10 млн тонн виробництва відновлюваного водню всередині ЄС і 10 млн тонн імпорту до 2030 року.

Висновки

В результаті проведеного аналізу літературних джерел можна сформувати такі напрями скорочення споживання викопного палива:

– заміщення у першу чергу вугілля альтернативними видами палива та відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ): універсальним водовугільним паливом, зрідженим синтетичним газом, звалищним газом, біометаном, зеленим воднем, твердим біопаливом: пелетами з різних видів залишків природного походження;

– впровадження відновлювані джерела енергії (ВДЕ): сонячної, вітрової, та їх комбінації між собою та з традиційними паливами (дизель).

Всі описані технології мають апробацію на промислових об'єктах.

Для кількісної оцінки обсягів заміщення викопного палива необхідно в подальшому розглядати перспективні продуктові баланси (вугілля, природного газу, нафтопродуктів), оцінити потребу у паливі на енергетичні та технологічні потреби. Невід'ємною частиною кількісної оцінки також є визначення економічної доцільності такого заміщення.

Список використаної літератури

1. Національний план з енергетики та клімату на період до 2030 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 25 червня 2024 р. №587-р. URL: https://me.gov.ua/view/bb0b9ef5-ea96-4b8a-8f2f-471faf32c9df

2. Директива Європейського Парламенту і Ради (ЄС) 2018/2001 від 11 грудня 2018 року про стимулювання використання енергії з відновлюваних джерел (нова редакція). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_039-18#Text

3. Домбровський О. Г., Тракслер І. С., Потапова М. В. Біометанування водню in-situ: оптимізація виробництва біометану та очищення біогазу від CO_2. *Відновлювана енергетика*. 2024. №3. С. 140-144. URL: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79)140-144

4. Palù, M., Peprah, M., Tsapekos, P., Kougias, P., Campa-naro, S., Angelidaki, I., & Treu, L. (2022). In-situ biogas upgrading assisted by bioaugmentation with hydrogen-otrophic methanogens during mesophilic and thermo-philic co-digestion. *Bioresource Technology*, *348*, 126754. URL: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126754

5. Алексєєнко В. В., Гончар В. П., Гончар А. О., Назаренко О. В., Проценко І. О., Сезоненко О. Б., Ялтишев А. В. Потенціал використання золошлаків вугільних теплових електростанцій для виробництва альтернативних видів палива (наприклад із золошлаку Ладижинської ТЕС). *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2023. № 4. С. 31–42. DOI: https://doi.org/10.33070/etars.4.2023.03

6. Ободович О. М., Целень Б. Я., Степанова О. Є., Недбайло А. Є., Булій Ю. В. Технологія та обладнання для одержання універсального водовугільного палива. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2024. № 1. DOI: https://doi.org/10.33070/etars.1.2024.02

7. Чернявський М. В., Мірошниченко Є. С., Провалов О. Ю. Особливості використання зрідженого вуглеводневого газу як резервного та альтернативного палива на вугільних ТЕЦ. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2022. №4. DOI: https://doi.org/10.33070/etars.4.2022.01

8. Чернявський М. В., Мірошниченко Є. С., Провалов О. Ю., Косячков О. В. Особливості та досвід переведення газомазутних котлів промислових ТЕЦ на спалювання біомаси та газового вугілля. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2024. №3. DOI: https://doi.org/10.33070/etars.3.2024.03

9. Кудря С. О., Рєпкін О. О., Рубаненко О. О., Яценко Л. В., Шинкаренко Л. Я. Етапи розвитку зеленої водневої енергетики України. *Відновлювана енергетика*. 2022. №1(168). С. 5–16. DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68).5-16

10. Іванов Ю. А., Крушневич С. П., Жук Г. В., Онопа Л. Р., Вербовський О. В., Комісаренко Д. А. Комплексна технологія утилізації біогазу полігонів твердих побутових відходів з виробленням електроенергії, тепла та вуглекислоти. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2024. № 3. С. 57–66. DOI: https://doi.org/10.33070/etars.3.2024.04

11. Клименко В. М., Супрун Т. Т. Перспективи впровадження технологій біологічного метанування в Україні. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2024. №2. С. 88-94. DOI: https://doi.org/10.33070/etars.2.2024.06

12. Zhu, X., Chen, L., Chen, Y., Cao, Q., Liu, X., & Li, D. (2020). Effect of H2 addition on the microbial community structure of a mesophilic anaerobic digestion system. *Energy*, vol. 198, 117368. https://doi.org/10.1016/j.en-ergy.2020.117368

13. Voelklein, M., Rusmanis, D., & Murphy, J. (2018). Bio-logical methanation: Strategies for in-situ and ex-situ upgrading in anaerobic digestion. *Applied Energy*, vol. 235, 1061–1071.DOI: https://doi.org/10.1016/j.apen-ergy.2018.11.006

14. Мікульонок І. О. Стан та перспективи одержання пресованого твердого біопалива. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2022. № 4. С. 15–30. DOI: https://doi.org/10.33070/etars.4.2022.02

15. Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року. Розпорядження КМ України від 29.12.2021 №1803-р зі змінами згідно з розпорядженням КМ України від 06.10.2023 № 899-р. DOI: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1803-2021-%D1%80#Text

16. Mysak S. Y., Shapoval S. P., Hyvliud A. M. Analysis of the Share of Renewable Energy Sources in the Gross Final Energy Consumption of European Countries. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2024. № 1. С. 59–73. DOI: https://doi.org/10.33070/etars.4.2022.02

17. Bondarenko D. Developing electrical models to simulate the conversion of solar radiation into electrical and thermal energy. *Відновлювана енергетика*. 2024. №4. С. 59-63. DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79)59-63

18. Ференц В. І. Ефективність використання агровольтаїки. *Відновлювана енергетика*. 2023. № 4. С. 55–63. DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.4(75)55-63

19. Кузнєцов М. П., Лисенко О. Забезпечення балансу енергії в локальній системі з відновлюваною генерацією. *Відновлювана енергетика*. 2023. № 1. С. 6–18. DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.1(72)6-18

20. Кудря С. О., Яценко Л. В., Шинкаренко Л. Я., Ткаленко М. Д. Електролітичне виробництво водню для вітроводневих станцій. *Відновлювана енергетика*. 2023. №3. С. 92-100. DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74)92-100

21. Басок Б. І., Дубовський С. В., Пастушенко Е. П., Нікітін Є. Є., Базєєв Є. Т. Теплові насоси як тренд низьковуглецевого розвитку енергетики. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2023. №2. С. 23-41. DOI: https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.02

22. DeriiV. O., Teslenko O. I., Sokolovska I. S. Methodical approach to estimating the potential of thermal energy production by heat pump plants in case of their implementation in regional district heating systems. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2023. № 2. С. 44–56. DOI: https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.03

23. Дзюбан Ю. І., Маляренко О. Є., Горський В. В., Євтухова Т. О. Підвищення ефективності теплозабезпечення тваринницьких комплексів із залученням теплонасосних установок. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2025. Т. 48. № 2. С. 80–91. DOI: https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2025.8

24. Кузнєцов М. П. Комплексне використання відновлюваних джерел енергії – підсумки науково-практичної конференції 2023 р. *Відновлювана енергетика*.2023. №2. С. 6-10. DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.2(73)6-10

25. Кобець М. І. Аналіз подальшого розвитку законодавства ЄС у сфері відновлюваної енергетики. Матеріали XXIV Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». Україна. Київ. 18–19 травня 2023 року. С. 61–62. DOI: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023

26. Корольова А. А. Правові аспекти «зеленої» енергетики у воєнний період. Матеріали XXIV Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». Україна. Київ. 18–19 травня 2023 року. С. 46–47. DOI: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023

27. Сулема О. К., Шукаєв С. М. Європейські тренди у відновлюваній енергетиці. Матеріали XXIV Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». Україна. Київ. 18–19 травня 2023 року. С. 65–66. DOI: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023

28. Чернявський А. В., Бориченко О. В., Пертко П. П. Впровадження систем енергетичного менеджменту на малих та середніх підприємствах України. Матеріали XXIV Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». Україна. Київ. 18–19 травня 2023 року. С. 167–168. DOI: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023

29. Каплун В. В., Макаревич С. С., Кулибаба Є., Самчук В. О. Програмно-технічне забезпечення систем динамічного енергоменеджменту Мікрогрід з полігенерацією. Матеріали XXIV Міжнародної науково- практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». Україна. Київ. 18–19 травня 2023 року. С. 158–159. DOI: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023

30. Ковальчук О. А., Лежнюк П. Д., Повстянко К. О. Технічні та нормативні заходи забезпечення надійності систем електропостачання з відновлюваними джерелами енергії. Матеріали XXIV Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». Україна. Київ. 18–19 травня 2023 року. С. 110–111. DOI: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023

31. Підбережна Н. О. Регулювання енергетичних потреб, як один із аспектів ефективного використання енергії в навчальних закладах. Матеріали XXIV Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». Україна. Київ. 18–19 травня 2023 року. С. 134. DOI: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023

32. Прокопенко В. В., Чорний А. О., Закладний О. О., Гребенюк Т. В. Визначення базового рівня енергоспоживання дошкільного навчального закладу. Матеріали XXIV Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». Україна. Київ. 18–19 травня 2023 року. С. 136. DOI: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023

33. Шевель А. П. Використання розумних сіток, для зберігання та розподілу енергії відповідно до потреб споживачів. Матеріали XXIV Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». Україна. Київ. 18–19 травня 2023 року. С. 94–95. DOI: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023

34. Пильтій С. С., Болотний М. П. Забезпечення протидії віяловим відключенням в інтелектуальних електричних мережах. Матеріали XXIV Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». Україна. Київ. 18–19 травня 2023 року. С. 81–82. DOI: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023

35. Хомутов С. В. Можливості використання ВДЕ в комбінованих системах електропостачання центрів обробки даних. Матеріали XXIV Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». Україна. Київ. 18–19 травня 2023 року. С. 88–89. DOI: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023

36. Кармазін О. О., Іванченко І. В. Проблеми та перспективи комплексних енергетичних систем на основі використання відновлюваних джерел енергії – підсумки XXV науково-практичної конференції 2024 р. *Відновлювана енергетика*. 2024. № 3. С. 29–35. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79)29-35

37. Гавриленко Я. В., Дерій В. О. Державне стимулювання відновлюваної енергетики. Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». Україна. Київ. 22–24 травня 2024 року. С. 76–77. DOI: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.22-24.05.2024

38. Остапчук О.В., Шевченко І.В. Використання гібридних систем на основі відновлюваних джерел в мікромережі: огляд. *Відновлювана енергетика*. 2022. № 4. С. 9–23. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4(71)9-25

References

1. Kabinet Ministriv Ukrainy (2024) *Natsionalnyi plan z enerhetyky ta klimatu na period do 2030 roku* [National Energy and Climate Plan for the period until 2030. Approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated June 25, 2024 No. 587-r.], Retrieved from: https://me.gov.ua/view/bb0b9ef5-ea96-4b8a-8f2f-471faf32c9df (accessed 18 September 2025).

2. Yevropeiskii Parlament i Rada YeS (2018) *Dyrektyva Yevropeiskoho Parlamentu i Rady (YeS) 2018/2001 pro stymuliuvannia vykorystannia enerhii z vidnovliuvanykh dzherel (nova redaktsiia)* [Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast)], Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_039-18#Text (accessed 18 September 2025).

3. Dombrovskyi O. H., Traksler I. S., Potapova M. V. (2024) Biometanuvannia vodniu in-situ: optymizatsiia vyrobnytstva biometanu ta ochyshchennia biohazu vid SO_2 [In-situ hydrogen biomethanation: optimization of biomethane production and biogas purification from CO_2]. *Vidnovliuvana enerhetyka* [*Renewable Energy*] (electronic journal), no. 3. pp. 140–144. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79)140-144 (accessed 18 September 2025).

4. Palù, M., Peprah, M., Tsapekos, P., Kougias, P., Campa-naro, S., Angelidaki, I., & Treu, L. (2022). In-situ biogas upgrading assisted by bioaugmentation with hydrogen-otrophic methanogens during mesophilic and thermo-philic co-digestion. *Bioresource Technology (electronic journal)*, vol. 348, 126754. Retrieved from: https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126754 (accessed 18 September 2025).

5. Aleksieienko V. V., Honchar V. P., Honchar A. O., Nazarenko O. V., Protsenko I. O., Sezonenko O. B., Yaltyshev A. V. (2023) Potentsial vykorystannia zoloshlakiv vuhilnykh teplovykh elektrostantsii dlia vyrobnytstva alternatyvnykh vydiv palyva (napryklad iz zoloshlaku Ladyzhynskoi TES) [The potential of using ash and slag from coal-fired thermal power plants for the production of alternative fuels (for example, from ash and slag from Ladyzhynska TPP)]. *Enerhotekhnolohii ta resursozberezhennia* [*Energy Technologies and Resource Conservation*] (electronic journal), vol. 77. no. 4. pp. 31–42. Retrieved from: https://doi.org/10.33070/etars.4.2023.03 (accessed 18 September 2025).

6. Obodovych O. M., Tselen B. Ya., Stepanova O. Ye., Nedbailo A. Ye., Bulii Yu. V. (2024) Tekhnolohiia ta obladnannia dlia oderzhannia universalnoho vodovuhilnoho palyva [Technology and equipment for obtaining universal water-coal fuel]. *Enerhotekhnolohii ta resursozberezhennia* [*Energy technologies and resource conservation*] (electronic journal), vol. 78. no. 1. pp. 24–33. Retrieved from: https://doi.org/10.33070/etars.1.2024.02 (accessed 18 September 2025).

7. Cherniavskyi M. V., Miroshnychenko Ye. S., Provalov O. Yu. (2022) Osoblyvosti vykorystannia zridzhenoho vuhlevodnevoho hazu yak rezervnoho ta alternatyvnoho palyva na vuhilnykh TETs [Features of the use of liquefied hydrocarbon gas as a backup and alternative fuel at coal-fired CHP plants]. *Enerhotekhnolohii ta resursozberezhennia* [*Energy technologies and resource conservation*] (electronic journal), no. 4. pp. 3–14. Retrieved from: https://doi.org/10.33070/etars.4.2022.01 (accessed 18 September 2025).

8. Cherniavskyi M. V., Miroshnychenko Ye. S., Provalov O. Yu., Kosiachkov O. V. (2024) Osoblyvosti ta dosvid perevedennia hazomazutnykh kotliv promyslovykh TETs na spaliuvannia biomasy ta hazovoho vuhillia [Features and experience of converting gas-oil boilers of industrial CHPs to burning biomass and gas coal]. *Enerhotekhnolohii ta resursozberezhennia* [*Energy technologies and resource conservation*] (electronic journal), vol. 80. no. 3. pp. 44–57. Retrieved from: https://doi.org/10.33070/etars.3.2024.03 (accessed 18 September 2025).

9. Kudria S. O., Riepkin O. O., Rubanenko O. O., Yatsenko L. V., Shynkarenko L. Ya. (2022) Etapy rozvytku zelenoi vodnevoi enerhetyky Ukrainy [Stages of development of green hydrogen energy in Ukraine]. *Vidnovliuvana enerhetyka* [*Renewable Energy*] (electronic journal), vol. 168. no. 1. pp. 5–16. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68).5-16 (accessed 18 September 2025).

10. Ivanov Yu. A., Krushnevych S. P., Zhuk H. V., Onopa L. R., Verbovskyi O. V., Komisarenko D. A. (2024) Kompleksna tekhnolohiia utylizatsii biohazu polihoniv tverdykh pobutovykh vidkhodiv z vyroblenniam elektroenerhii, tepla ta vuhlekysloty [Integrated technology of biogas utilization of solid household waste landfills with the production of electrocity, heat and carbon dioxide] *Enerhotekhnolohii ta resursozberezhennia* [*Energy Technologies & Resource Saving*] (electronic journal), vol. 80. no. 3. pp. 57–68. Retrieved from: https://doi.org/10.33070/etars.3.2024.04 (accessed 18 September 2025).

11. Klymenko V. M., Suprun T. T. (2024) Perspektyvy vprovadzhennia tekhnolohii biolohichnoho metanuvannia v Ukraini [Integrated technology for biogas utilization from solid waste landfills with the generation of electricity, heat and carbon dioxide]. *Enerhotekhnolohii ta resursozberezhennia* [*Energy technologies and resource conservation*] (electronic journal), vol. 79. no. 2. pp. 88–95. Retrieved from: https://doi.org/10.33070/etars.2.2024.06 (accessed 18 September 2025).

12. Zhu, X., Chen, L., Chen, Y., Cao, Q., Liu, X., & Li, D. (2020). Effect of H_2 addition on the microbial community struc-ture of a mesophilic anaerobic digestion system. *Energy*, vol. 198, 117368. Retrieved from: https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117368. (accessed 18 September 2025).

13. Voelklein, M., Rusmanis, D., & Murphy, J. (2018). Bio-logical methanation: Strategies for in-situ and ex-situ upgrading in anaerobic digestion. *Applied Energy*, vol. 235, pp. 1061–1071. Retrieved from: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.006 (accessed 19 September 2025).

14. Mikulonok I. O. Stan ta perspektyvy oderzhannia presovanoho tverdoho biopalyva (2022) [State and prospects for obtaining pressed solid biofuel]. *Enerhotekhnolohii ta resursozberezhennia* [*Energy technologies and resource conservation*] (electronic journal), no. 4. pp. 15–30. Retrieved from: https://doi.org/10.33070/etars.4.2022.02 (accessed 19 September 2025).

15. Kabinetu Ministriv Ukrainy (2023) *Pro Natsionalnyi plan dii z enerhoefektyvnosti na period do 2030 roku* [On the National Energy Efficiency Action Plan for the period until 2030. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 12/29/2021 no. 1803-r as amended by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 10/06/2023 no. 899-r.]. Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1803-2021-%D1%80#Text (accessed 19 September 2025).

16. Mysak S. Y., Shapoval S. P., Hyvliud A. M. (2024) Analysis of the Share of Renewable Energy Sources in the Gross Final Energy Consumption of European Countries. *Enerhotekhnolohii ta resursozberezhennia* [*Energy technologies and resource conservation*] (electronic journal), no. 1. pp. 59–75. Retrieved from: https://doi.org/10.33070/etars.1.2024.05 (accessed 19 September 2025).

17. Bondarenko D. (2024) Developing electrical models to simulate the conversion of solar radiation into electrical and thermal energy. *Vidnovliuvana enerhetyka* [*Renewable Energy*] (electronic journal), no. 4. pp. 59–63. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79)59-63 (accessed 19 September 2025).

18. Ferents V. I. (2023) Efektyvnist vykorystannia ahrovoltaiky [Efficiency of using agrovoltaics]. *Vidnovliuvana enerhetyka* [*Renewable Energy*] (electronic journal), no. 4. pp. 55–63. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.4(75)55-63 (accessed 19 September 2025).

19. Kuznietsov M. P., Lysenko O. (2023) Zabezpechennia balansu enerhii v lokalnii systemi z vidnovliuvanoiu heneratsiieiu [Ensuring energy balance in a local system with renewable generation]. *Vidnovliuvana enerhetyka* [*Renewable Energy*] (electronic journal), no. 1. pp. 6-18. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.1(72)6-18 (accessed 19 September 2025).

20. Kudria S. O., Yatsenko L. V., Shynkarenko L. Ya., Tkalenko M. D. (2023) Elektrolitychne vyrobnytstvo vodniu dlia vitrovodnevykh stantsii [Electrolytic production of hydrogen for wind-hydrogen stations]. *Vidnovliuvana enerhetyka* [*Renewable Energy*] (electronic journal), no. 3. pp. 92-100. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74)92-100 (accessed 19 September 2025).

21. Basok B. I., Dubovskyi S. V., Pastushenko E. P., Nikitin Ye. Ye., Bazieiev Ye. T. (2023) Teplovi nasosy yak trend nyzkovuhletsevoho rozvytku enerhetyky [Heat pumps as a trend of low-carbon development of the energy sector]. *Enerhotekhnolohii ta resursozberezhennia* [*Energy technologies and resource conservation*] (electronic journal), vol. 75. no. 2. pp. 23–44. Retrieved from: https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.02 (accessed 19 September 2025).

22. DeriiV. O., Teslenko O. I., Sokolovska I.S. (2023) Methodical approach to estimating the potential of thermal energy production by heat pump plants in case of their implementation in regional district heating systems. *Enerhotekhnolohii ta resursozberezhennia* [*Energy technologies and resource conservation*] (electronic journal), no. 2. pp. 44–56. Retrieved from: https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.03 (accessed 19 September 2025).

23. Dziuban Yu. I., Maliarenko O. Ye., Horskyi V. V., Yevtukhova T. O. (2025) Pidvyshchennia efektyvnosti teplozabezpechennia tvarynnytskykh kompleksiv iz zaluchenniam teplonasosnykh ustanovok [Increasing the efficiency of heat supply of livestock complexes with the use of heat pump units]. *Teplofizyka ta teploenerhetyka* [*Thermal physics and heat power engineering*] (electronic journal), vol. 48. no. 2. pp. 80-91. Retrieved from: https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2025.8 (accessed 19 September 2025).

24. Kuznietsov M. P. (2023) Kompleksne vykorystannia vidnovliuvanykh dzherel enerhii – pidsumky naukovo-praktychnoi konferentsii 2023 r. [Integrated use of renewable energy sources – results of the scientific and practical conference 2023]. *Vidnovliuvana enerhetyka* [*Renewable energy*] (electronic journal), no. 2. pp. 6–10. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.2(73)6-10 (accessed 19 September 2025).

25. Kobets M. I. (2023) Analiz podalshoho rozvytku zakonodavstva YeS u sferi vidnovliuvanoi enerhetyky [Analysis of the further development of EU legislation in the field of renewable energy]. Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the 21st Century". Ukraine. Kyiv. May 18–19, 2023. Pp. 61–62. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023 (accessed 19 September 2025).

26. Korolova A. A. (2023) Pravovi aspekty «zelenoi» enerhetyky u voiennyi period [Legal aspects of "green" energy during the war period]. Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the 21st Century". Ukraine. Kyiv. May 18–19, 2023. pp. 46–47. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023 (accessed 19 September 2025).

27. Sulema O. K., Shukaiev S. M. Yevropeiski trendy u vidnovliuvanii enerhetytsi [European trends in renewable energy]. Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the 21st Century". Ukraine. Kyiv. May 18–19, 2023. pp. 65–66. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023 (accessed 19 September 2025).

28. Cherniavskyi A. V., Borychenko O. V., Pertko P. P. (2023) Vprovadzhennia system enerhetychnoho menedzhmentu na malykh ta serednikh pidpryiemstvakh Ukrainy [Implementation of energy management systems in small and medium-sized enterprises of Ukraine]. Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the XXI Century". Ukraine. Kyiv. May 18–19, 2023. pp. 167–168. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023 (accessed 19 September 2025).

29. Kaplun V. V., Makarevych S. S., Kulybaba Ye., Samchuk V. O. (2023) Prohramno-tekhnichne zabezpechennia system dynamichnoho enerhomenedzhmentu Mikrohrid z poliheneratsiieiu [Software and hardware support for dynamic energy management systems Microgrid with polygeneration]. Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the 21st Century". Ukraine. Kyiv. May 18–19, 2023. pp. 158–159. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023 (accessed 19 September 2025).

30. Kovalchuk O. A., Lezhniuk P. D., Povstianko K. O. (2023) Tekhnichni ta normatyvni zakhody zabezpechennia nadiinosti system elektropostachannia z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii [Technical and regulatory measures to ensure the reliability of power supply systems with renewable energy sources]. Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the 21st Century". Ukraine. Kyiv. May 18–19, 2023. pp. 110–111. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023 (accessed 19 September 2025).

31. Pidberezhna N. O. Rehuliuvannia enerhetychnykh potreb, yak odyn iz aspektiv efektyvnoho vykorystannia enerhii v navchalnykh zakladakh (2023) [Regulation of energy needs as one of the aspects of efficient energy use in educational institutions]. Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the XXI Century". Ukraine. Kyiv. May 18–19, 2023. pp. 134. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023 (accessed 19 September 2025).

32. Prokopenko V. V., Chornyi A. O., Zakladnyi O. O., Hrebeniuk T. V. (2023) Vyznachennia bazovoho rivnia enerhospozhyvannia doshkilnoho navchalnoho zakladu [Determining the basic level of energy consumption of a preschool educational institution]. Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the XXI Century". Ukraine. Kyiv. May 18–19, 2023. P. 136. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023 (accessed 19 September 2025).

33. Shevel A. P. (2023) Vykorystannia rozumnykh sitok, dlia zberihannia ta rozpodilu enerhii vidpovidno do potreb spozhyvachiv [Using smart grids to store and distribute energy according to consumer needs]. Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the 21st Century". Ukraine. Kyiv. May 18–19, 2023. pp. 94–95. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023 (accessed 19 September 2025).

34. Pyltii S. S., Bolotnyi M. P. (2023) Zabezpechennia protydii viialovym vidkliuchenniam v intelektualnykh elektrychnykh merezhakh [Ensuring counteraction to fan outages in intelligent electrical networks]. Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the 21st Century". Ukraine. Kyiv. May 18–19, 2023. pp. 81–82. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023 (accessed 19 September 2025).

35. Khomutov S. V. (2023) Mozhlyvosti vykorystannia VDE v kombinovanykh systemakh elektropostachannia tsentriv obrobky danykh [Possibilities of using renewable energy in combined power supply systems of data processing centers]. Proceedings of the XXIV International Scientific and Practical Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the 21st Century". Ukraine. Kyiv. May 18–19, 2023. pp. 88–89. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023 (accessed 19 September 2025).

36. Karmazin O. O., Ivanchenko I. V. (2024) Problemy ta perspektyvy kompleksnykh enerhetychnykh system na osnovi vykorystannia vidnovliuvanykh dzherel enerhii – pidsumky XXV naukovo-praktychnoi konferentsii 2024 r. [Problems and prospects of complex energy systems based on the use of renewable energy sources – results of the XXV scientific and practical conference of 2024] *Vidnovliuvana enerhetyka* [*Renewable energy*], no. 3. pp. 29–35. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79)29-35 (accessed 19 September 2025).

37. Havrylenko Ya. V., Derii V. O. (2024) Derzhavne stymuliuvannia vidnovliuvanoi enerhetyky [State stimulation of renewable energy]. Proceedings of the XXV International Scientific and Practical Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the XXI Century". Ukraine. Kyiv. May 22–24, 2024. pp. 76–77. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.22-24.05.2024 (accessed 19 September 2025).

38. Ostapchuk O. V., Shevchenko I. V. (2022) Vykorystannia hibrydnykh system na osnovi vidnovliuvanykh dzherel v mikromerezhi: ohliad [The use of hybrid systems based on renewable sources in a microgrid: a review]. *Vidnovliuvana enerhetyka* [*Renewable Energy*], no. 4. pp. 9–23. Retrieved from: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4(71)9-25 (accessed 19 September 2025).

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 20.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 631.362:633.11 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.23

М. В. НЕМЧЕНКО
експерт з розвитку та управління сільськогосподарським бізнесом
ORCID: 0009-0007-3277-4173

ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ПРИ ОЧИЩЕННІ ЗЕРНА ПШЕНИЦІ ЗА УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО ПАРКУ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

Раціональне використання технічних ресурсів у зернозбиральному процесі має ключове значення для зменшення втрат урожаю, особливо в умовах експлуатації зношеного машинно-тракторного парку фермерських господарств. Найбільш вразливою ділянкою є система очищення вороху, де недосконале регулювання решіт, неадаптований обдув і надлишкова подача матеріалу спричиняють істотне зниження виходу кондиційного зерна. Дослідження впливу технічного стану машин, швидкості подачі вороху, параметрів повітряного потоку та конструктивних особливостей решіт на рівень втрат дає змогу обґрунтувати ефективні заходи щодо оптимізації очисного процесу.

Мета роботи – визначити ключові фактори втрат зерна під час очищення пшениці в умовах використання комбайнів різного технічного стану та розробити прикладні рекомендації для зниження цих втрат у фермерських господарствах. Дослідження проведено у 2024–2025 роках на базі трьох господарств Лісостепу України за участю комбайнів John Deere 9500, Claas Lexion 450 та СК-5 «Нива». Аналіз охоплював порівняння втрат за масово-ваговим та сенсорним методом, тестування різних режимів очищення, а також моделювання аеродинамічного потоку за допомогою CFDDEM.

Результати роботи засвідчили, що найнижчі втрати зерна (0,62 %) спостерігались у сучасній техніці з автоматизованим керуванням, тоді як у зношених машинах рівень втрат перевищував 2,8 %. Експериментально доведено ефективність регламентованого обмеження подачі вороху, оптимізації решітної геометрії та впровадження сенсорного моніторингу. Запропоновані заходи дозволяють фермерським господарствам знизити втрати зерна без необхідності повної модернізації техніки.

Ключові слова: *втрати зерна, очищення вороху, сепарація зернових домішок, решітна система комбайна, регулювання повітряного потоку, сенсорний моніторинг втрат, CFDDEM моделювання.*

M. V. NEMCHENKO
Expert in Agricultural Business Development and Management
ORCID: 0009-0007-3277-4173

REDUCING GRAIN LOSSES DURING WHEAT CLEANING UNDER THE OPERATION OF A FARM'S MACHINE AND TRACTOR FLEET

The rational use of technical resources in the grain harvesting process is crucial for minimizing yield losses, especially under the operation of worn-out machine and tractor fleets in smallholder farms. The most vulnerable stage is the cleaning system, where poor sieve adjustment, unoptimized airflow, and excessive material feeding significantly reduce the yield of marketable grain. Investigating the impact of machine condition, feeding rate, airflow parameters, and sieve construction on grain loss levels enables the substantiation of effective measures for optimizing the cleaning process.

The aim of the study was to identify the key factors of grain loss during wheat cleaning under the operation of combines in various technical conditions and to develop practical recommendations for reducing these losses in farm settings. The study was conducted in 2024–2025 on the basis of three farms in the Forest-Steppe zone of Ukraine, using the combines John Deere 9500, Claas Lexion 450, and SK-5 "Niva." The analysis included a comparison of losses using gravimetric and sensor methods, testing of different cleaning modes, and airflow modeling using CFDDEM simulation.

The results demonstrated that the lowest grain losses (0.62 %) occurred in modern machines with automated control systems, whereas worn-out equipment showed losses exceeding 2.8 %. Experimental evidence confirmed the effectiveness of controlled feeding rate, optimized sieve geometry, and sensor-based monitoring. The proposed measures allow farms to reduce grain losses without the need for full-scale fleet modernization.

Key words: *grain loss, crop cleaning, separation of grain impurities, combine sieve system, airflow regulation, sensor-based loss monitoring, CFDDEM modeling.*

© Немченко М. В., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Постановка проблеми

Проблема зниження втрат зерна на післязбиральному етапі, зокрема при первинному очищенні пшениці, набула особливої актуальності в умовах інтенсифікації агровиробництва та децентралізації сільського господарства, що супроводжується зростанням питомої ролі фермерських господарств у забезпеченні продовольчої безпеки. Значна частина втрат припадає саме на ділянку сепараційної обробки вороху в зернозбиральному комбайні, де взаємодіють високошвидкісні потоки повітря, неуніфікована суміш зерна та домішок, а також коливальні решітні системи [1; 2]. За відсутності точного регулювання ці процеси призводять до недоочищення, перевантаження решіт, неефективної аспірації, а відтак – до втрати кондиційного зерна разом із домішками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На думку фахівців, причиною нестабільної роботи систем очищення є як конструктивні недоліки, так і невідповідність експлуатаційних режимів характеристикам вороху, що постійно змінюється в польових умовах [3]. Особливо це актуально для фермерських господарств, які експлуатують техніку в умовах обмеженого ресурсу модернізації, часто без високоточного налаштування решіт, вентиляторів і регуляторів нахилу. Такі умови призводять до зростання втрат до 2–3,5 % у валовій масі пшениці [4; 5]. На додачу, застарілий машинно-тракторний парк не забезпечує адекватної швидкісної адаптації до змін агрофізичних властивостей зернового матеріалу.

Результати численних експериментальних та моделювальних досліджень підтверджують, що найефективнішою стратегією зменшення втрат є автоматизоване адаптивне регулювання параметрів очищення із залученням систем моніторингу втрат, прогнозного керування та математичного моделювання потоків вороху [6; 7]. Зокрема, впровадження алгоритмів на базі подійно-тригерного керування (event-triggered MPC) дозволяє скорочувати втрати на 28–35 % без зменшення продуктивності агрегату [8]. Крім того, використання сенсорних пристроїв із зворотним зв'язком забезпечує стабільність процесу навіть у разі флуктуацій густини та вологості сировини [9; 10].

Актуальним напрямом є також оптимізація швидкості руху комбайна залежно від морфологічних характеристик пшеничного вороху. Побудова регресійних моделей дозволяє прогнозувати критичні зони втрат і оперативно коригувати параметри подачі [11]. Сучасні розробки CFD DEM моделювання очищення при нерівномірній подачі матеріалу дозволяють на 25–30 % зменшити вміст домішок і об'єм втрат зерна. Особливий інтерес становить застосування stripper жаток, які дозволяють зменшити кількість подрібнених рослинних решток у воросі, знизити навантаження на систему очищення та досягти втрат у межах лише 0,1–0,15 % [12]. Такі жатки відкривають можливість мінімізації вторинного обмолоту й підвищення енергетичної ефективності всього процесу збирання.

Незважаючи на наявність технологічних рішень, рівень їх адаптації до умов українських фермерських господарств є недостатнім. На практиці часто відсутній диференційований підхід до налаштування систем очищення залежно від структури вороху, не використовується оперативний контроль втрат, а режим роботи вентилятора та решіт встановлюється за загальними схемами, без урахування поточних параметрів [13].

Формулювання мети дослідження

Враховуючи викладене, нагальною потребою є комплексне дослідження параметрів втрат зерна пшениці при очищенні в умовах фермерських господарств із урахуванням конструктивних особливостей машинно тракторного парку, реальних умов експлуатації, а також потенціалу інноваційних технічних рішень.

Метою цієї роботи є аналіз динаміки втрат зерна під час очищення в системі комбайна, визначення впливу регулювань робочих органів і обґрунтування технічних заходів щодо їх зниження на рівні господарств.

Викладення основного матеріалу дослідження

Матеріалом дослідження були зернові ворохи пшениці (Triticum aestivum L.) після збирання на полях фермерських господарств, розташованих у межах центральної частини Лісостепу України. Польові дослідження проводилися у 2024–2025 роках на базі трьох господарств із різною структурою машинно-тракторного парку, що дало змогу порівняти вплив технічного стану зернозбиральної техніки на обсяг втрат під час очищення зерна. Ділянки, що були обрані для експерименту, вирізнялися близькими ґрунтово-кліматичними характеристиками, що дозволило мінімізувати вплив природних змінних на результати. Збирання врожаю здійснювалося комбайнами типу John Deere 9500, Claas Lexion 450 та вітчизняною моделлю СК-5 «Нива», кожна з яких експлуатувалася в різному технічному стані (новий, модернізований, зношений відповідно).

Об'єктами дослідження були основні експлуатаційні режими системи очищення зернозбиральних комбайнів, зокрема швидкість вентилятора, кут нахилу решіт, продуктивність подачі вороху та частота коливання сит. Для кожного комбайна було проведено не менше трьох циклів збирання з повним обліком втрат на виході з системи очищення. Відбір зразків здійснювали в момент стабілізації робочого процесу. Контрольні зразки зернової суміші відбирали безпосередньо після виходу з системи очищення за допомогою вловлювачів втрат, встановлених у задній частині комбайна згідно з методикою [4].

Для визначення втрат зерна застосовували два підходи: масовий (зважування зібраного матеріалу) та об'ємно-ваговий (з урахуванням питомої густини очищеного зерна й домішок), що забезпечувало підвищену точність вимірювання. Зразки сортували вручну з наступним лабораторним аналізом для відокремлення фракцій кондиційного зерна, домішок та незернової маси. Масову частку втрат обчислювали як відсоткове відношення зерна,

яке не було відібране решітною системою, до загальної маси вороху, поданого на очищення. Розрахунки проводили за формулою:

$$\text{Втрати (\%)} = (Мвт/Мзаг) \times 100,$$

де *Мвт* – маса втрат зерна, *Мзаг* – загальна маса обмолоченого вороху.

Крім того, досліджувалася ефективність очищення залежно від режиму подачі вороху. Для цього змінювали швидкість подачі в трьох інтервалах: < 3 кг/с, 3–5 кг/с, > 5 кг/с [11]. Зміни в роботі вентиляторів і решіт аналізували за допомогою мобільних сенсорів втрат, з'єднаних з логгерами, що фіксували динаміку у реальному часі [9; 6].

Для оцінки ефективності очищення також застосовували моделювання на основі попередньо запрограмованих сценаріїв – CFDDEMмодель повітряного розподілу в ситовій зоні. Вихідні параметри включали геометрію решіт, траєкторії частинок, силу аеродинамічного підйому та кут падіння зерна. Моделювання здійснювали за допомогою програмного пакету *ANSYS Fluent 2023*, результати верифікували порівнянням із фактичними вимірюваннями в полі. Це дозволило простежити вплив форми отворів решіт та типу решітного поля на рівень втрат зерна [8; 7].

Усі експерименти повторювалися тричі для забезпечення достовірності результатів. Статистичну обробку даних проводили із використанням програмного забезпечення *STATISTICA 13*, застосовуючи дисперсійний аналіз та критерій Фішера при рівні значущості $\alpha = 0,05$. Значення втрат зерна виражали у відсотках від валової маси вороху, із зазначенням середньоквадратичного відхилення. Результати зведено у табл. 1.

У ході дослідження на трьох фермерських господарствах Лісостепу України було зафіксовано рівень втрат зерна пшениці після очищення вороху в умовах однакових агрофізичних параметрів поля: сорт «Колос Миронівський», вологість зерна 14,3–14,7 %, густота стояння 3,7–3,9 млн/га, середній рівень засміченості вороху 11,5 %. Для забезпечення однорідності фонових факторів комбайнування проводилось в один агроперіод, за однакової вологості повітря, температури (22–24 °C) та швидкості вітру (1–2 м/с).

У досліді брали участь три типи комбайнів, що суттєво відрізнялись як за конструкцією, так і за ступенем технічного зношення:

– *John Deere 9500* – імпортна машина у відмінному технічному стані (менше 4 років експлуатації);
– *Claas Lexion 450* – техніка з проведеною модернізацією системи очищення (10 років експлуатації);
– *СК-5 «Нива»* – базова вітчизняна модель із понад 20 роками експлуатації без реконструкції.

Рівень втрат зерна визначався за масово-ваговим методом із фіксацією об'єму кондиційного зерна, що виходить за межі очисної системи разом із домішками. Середні значення втрат склали:

– John Deere 9500 – 0,62 % від маси вороху;
– Claas Lexion 450 – 1,18 %;
– СК-5 «Нива» – 2,83 %.

Аналіз отриманих даних свідчить про статистично достовірне перевищення рівня втрат у СК-5 «Нива» порівняно з обома іншими комбайнами ($p < 0,05$). Основними причинами підвищених втрат у цій машині є відсутність автоматизованої системи регулювання решіт та вентилятора, нерівномірне коливання сита, недостатня ефективність аспіраційного потоку, а також високий знос елементів очищення [14].

Модель Claas, попри старший вік, демонструвала кращі показники, що зумовлено модернізованою системою очищення з оновленими решітами та регульованим диференційованим обдувом. Найнижчий рівень втрат зафіксовано в John Deere, що має датчики заповнення бункера та автоматичну систему регулювання об'ємної подачі вороху відповідно до режиму очищення [9; 6].

Таким чином, саме технічний стан, тип решітної системи та наявність адаптивного керування визначають ефективність очищення й обсяг втрат зерна, навіть за однакових польових умов. Відмінності між машинами не можна зводити лише до їхнього віку – ключову роль відіграє ступінь модернізації та тип керування повітряним потоком.

Таблиця 1

Порівняльні дані втрат зерна в комбайнах різних моделей і технічного стану

Модель комбайна	Рік експлуатації (поточний стан)	Наявність автоматичного регулювання очищення	Середній рівень втрат (%)	Основні чинники втрат
John Deere 9500	< 4 роки (новий)	Так	0,62	Автоматичне регулювання подачі вороху та обдуву, стабільна решітна система
Claas Lexion 450	10 років (модернізований)	Частково	1,18	Проведена модернізація решіт та вентилятора, часткове ручне керування
СК-5 «Нива»	> 20 років (зношений)	Ні	2,83	Високий ступінь зносу, ручне регулювання, нерівномірність обдуву

Аналіз таблиці 1 свідчить про чітку залежність рівня втрат зерна від технічного стану та оснащення комбайнів. Найменші втрати зафіксовано у машини *John Deere 9500* (0,62 %), що оснащена повноцінною автоматикою

регулювання очищення. *Claas Lexion 450*, попри триваліший термін експлуатації, показав помірні втрати (1,18 %) завдяки модернізації системи очищення. Найвищі втрати характерні для *СК-5 «Нива»* (2,83 %), де відсутнє будь-яке автоматичне керування й зафіксований високий знос робочих елементів. Таким чином, саме технічна оснащеність, а не лише вік техніки, є визначальним чинником ефективності очищення зерна.

Аналіз отриманих даних показав, що технічний стан зернозбиральних машин мав вирішальний вплив на обсяг втрат зерна під час очищення вороху. Встановлено чітку тенденцію: зі зростанням ступеня зношеності техніки втрати зростають нелінійно, причому у зношеного комбайна СК-5 «Нива» спостерігалося понад чотириразове перевищення втрат порівняно з новим John Deere 9500.

Машини з автоматизованим або частково автоматизованим керуванням очищенням (John Deere 9500, Claas Lexion 450) забезпечували стабільний процес сепарації навіть за змінних умов вороху, що зумовлювало менший рівень втрат. Натомість комбайн СК-5 не мав змоги компенсувати нерівномірність подачі або засміченість матеріалу, внаслідок чого виникали перевантаження решіт і нерівномірний розподіл потоку повітря, що сприяло втратам зерна разом із дрібною солом'яною фракцією. Ці відхилення були особливо критичними за підвищених обсягів вороху – при збиранні пшениці з густотою понад 4 млн стебел на гектар.

Окрему увагу було приділено вивченню впливу швидкості подачі вороху на рівень втрат зерна. В усіх трьох машинах зростання інтенсивності подачі понад 5 кг/с призводило до різкого зростання втрат:

– для John Deere – з 0,52 % до 0,93 %,
– для Claas – з 1,01 % до 1,88 %,
– для СК-5 – з 2,10 % до 3,67 %.

Найстабільніший рівень втрат у межах подачі 3–5 кг/с був зафіксований у John Deere, де автоматичне регулювання решітної системи адаптувалося до коливань навантаження без ручного втручання [9]. У Claas Lexion 450 зростання втрат на фоні підвищеної подачі було більш плавним, що свідчить про ефективність модернізованої системи аспірації [6]. Натомість у СК-5 на ділянках з максимальною подачею було зафіксовано перенасичення очисної камери, розбалансування потоку й характерне просіювання кондиційного зерна у відходи [2; 5]. Таким чином, технічна зношеність агрегатів і швидкість подачі вороху виявилися двома ключовими параметрами, що в сукупності визначали ефективність процесу очищення. За відсутності можливості модернізації або заміни обладнання рекомендовано жорстко обмежувати інтенсивність подачі до 3–4 кг/с у старих моделях, оскільки перевищення цього порога в умовах ручного регулювання спричиняє непропорційне зростання втрат.

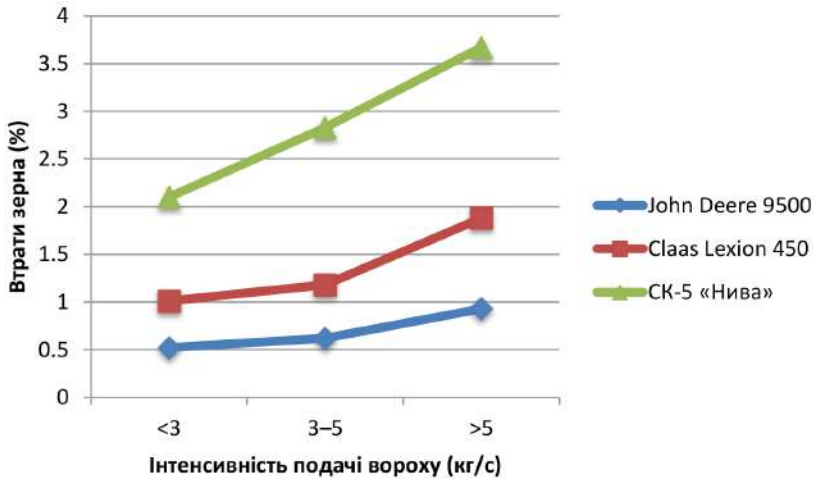


Рис. 1. Залежність втрат зерна від інтенсивності подачі вороху при стабільному вентиляторному режимі

Аналіз даних, представлених на рисунку 1, чітко демонструє залежність втрат зерна від інтенсивності подачі вороху в системи очищення при стабільному вентиляторному режимі. Спостерігається загальна тенденція до експоненційного зростання втрат із підвищенням швидкості подачі вороху, однак характер цієї залежності істотно відрізняється залежно від типу комбайна. У John Deere 9500, оснащеному системою автоматичного регулювання подачі та обдуву, втрати зерна залишаються відносно низькими в усьому діапазоні навантажень: при збільшенні подачі з <3 кг/с до >5 кг/с втрати зросли з 0,52 % до 0,93 %, що свідчить про високу стабільність очисної системи навіть за інтенсивного режиму роботи. Це вказує на ефективну взаємодію решіт, вентилятора та датчиків контролю потоку [9].

У Claas Lexion 450 підвищення навантаження призвело до зростання втрат із 1,01 % до 1,88 %. Така динаміка є більш вираженою, що пояснюється частковою модернізацією техніки: при середніх подачах система функціонувала ефективно, однак за максимального навантаження виникала неповна сепарація зерна, що виводилося разом

із домішками. Найбільш критичні показники спостерігаються у СК-5 «Нива», де втрати зростають з 2,10 % при мінімальному навантаженні до 3,67 % при подачі понад 5 кг/с. Це свідчить про нездатність застарілої очисної системи компенсувати підвищене навантаження, а також про низьку ефективність обдуву, нерівномірність решітного руху й втрату частини зерна через бокове просіювання [2; 5].

Зіставлення всіх трьох кривих дає підстави для висновку: оптимальний рівень подачі для техніки без автоматичного регулювання не повинен перевищувати 3–3,5 кг/с, тоді як сучасні моделі здатні ефективно працювати й за умов підвищеної інтенсивності. Це підтверджує необхідність технічної модернізації машинно-тракторного парку в фермерських господарствах для мінімізації втрат і підвищення ефективності зернозбирального процесу.

Дослідження ефективності регулювання параметрів очищення зерна в межах практичних налаштувань показало, що оптимальна комбінація частоти коливання решіт та швидкості повітряного потоку вентилятора відіграє вирішальну роль у зменшенні втрат зерна. Випробування проводились у трьох типових режимах: стандартному (за заводськими рекомендаціями), зниженому (на 15 % менше обертів вентилятора) та підвищеному (збільшення кута нахилу решіт на 5° та швидкості обдуву на 20 %). Найменші втрати зафіксовано при середньому рівні обдуву (16–18 м/с) та частоті коливань решіт 4–5 Гц. Така комбінація забезпечувала стабільне просіювання дрібних фракцій і одночасно утримувала кондиційне зерно в решітному полі. При зменшенні швидкості вентилятора до <14 м/с відзначалося накопичення дрібної соломи, що блокувало рух зерна і спричиняло його витіснення за межі решіт разом із легкими домішками. Водночас надмірне збільшення обдуву до >20 м/с призводило до виносу навіть кондиційних зернин – особливо в умовах сухого вороху [7].

У комбайні *Claas Lexion 450* ефективним виявився режим із ручним відкриттям верхньої решітки на 18 мм, нижньої – на 8–10 мм, та обертами вентилятора близько 950 об/хв. У *John Deere 9500*, де регулювання здійснювалося автоматично, система обирала близькі параметри, але змінювала їх динамічно залежно від поточної вологості вороху та заповненості зернового бункера [9]. Для *СК-5 «Нива»* найнижчі втрати (2,1 %) зафіксовано при максимально відкритій решітці та обертах вентилятора 1050–1100 об/хв, однак цей режим супроводжувався зростанням домішок у очищеному зерні, що свідчить про конфлікт між чистотою і збереженням маси. Окремо вивчалась ефективність сенсорної системи моніторингу втрат зерна в реальному часі, встановленої на комбайнах John Deere та Claas. Сенсори фіксували частоту зіткнення частинок із приймальною пластиною в хвості комбайна, перетворюючи її на електричні сигнали, які передавалися на дисплей у кабіні. Це дозволяло оператору в режимі реального часу реагувати на критичні відхилення – наприклад, змінювати швидкість руху або режим подачі вороху [8].

Порівняння результатів сенсорного моніторингу з масово-ваговим методом виявило високий ступінь кореляції ($r = 0,94$). Розбіжності у вимірюваннях не перевищували 0,12–0,17 % у випадках стабільної подачі та ≤0,25 % у випадках коливань навантаження. Таким чином, сенсорна система забезпечує достатню точність для практичного використання, особливо у поєднанні з автоматизованим керуванням решітами та обдувом [6]. На відміну від традиційного методу, сенсорна система дозволяє зменшити втрати не постфактум, а в момент їх виникнення, що має принципове значення для фермерських господарств, де кожна десята частка врожаю має вагу. Експлуатаційні результати свідчать, що інтеграція сенсорних систем із блоком керування подачею може знизити загальні втрати до 0,5–0,7 % при належному калібруванні [11].

Таблиця 2

Порівняння втрат зерна за результатами сенсорного й масово-вагового методу

Модель комбайна	Втрати за масово-ваговим методом (%)	Втрати за сенсорним моніторингом (%)	Різниця між методами (%)	Наявність сенсорної системи
John Deere 9500	0,62	0,67	0,05	Так
Claas Lexion 450	1,18	1,26	0,08	Так
СК-5 «Нива»	2,83			Ні

Аналіз Таблиці 2 засвідчує високу збіжність між показниками втрат зерна, отриманими за масово-ваговим методом та системою сенсорного моніторингу. Для *John Deere 9500* розбіжність склала лише 0,05 %, а для *Claas Lexion 450* – 0,08 %, що свідчить про високу точність сенсорних систем у сучасних комбайнах. У *СК-5 «Нива»* сенсорна система відсутня, що позбавляє можливості оперативного контролю втрат. Висновок: сенсорний моніторинг є ефективним і надійним інструментом для виявлення втрат у режимі реального часу, придатним для впровадження на практиці.

Проведене CFDDEM моделювання дозволило наочно відтворити умови функціонування системи очищення зернозбирального комбайна в динаміці, з урахуванням взаємодії потоків повітря, частинок вороху та конструктивних особливостей решітного блока. Імітаційна модель базувалася на попередньо оцифрованій геометрії очисної камери із заданими параметрами повітряного тиску, кута нахилу решіт, частоти коливань і швидкості подачі вороху [8].

У процесі моделювання було протестовано три варіанти геометрії решіт:

1) стандартна прямокутна перфорація (12 × 20 мм),
2) комбінована перфорація із змінним розміром отворів (нижній ярус – 10 × 15 мм, верхній – 14 × 22 мм),
3) округлі отвори зі зміщенням (овальні 10 × 18 мм, розміщені в шаховому порядку).

Аналіз траєкторій частинок показав, що комбінована решітна структура забезпечувала найкращу селективність сепарації: важкі зернові частинки проходили крізь отвори нижнього ярусу, а легкі домішки залишалися на поверхні верхніх решіт, ефективно вивітрюючись аспіраційним потоком. У цьому варіанті втрати зерна знижувалися на 23–26 % порівняно зі стандартною геометрією, а концентрація домішок у кінцевому продукті – на 18–20 % [7].

Структура повітряного потоку також виявилася критичною. При ламінарному розподілі повітря з постійною швидкістю втрати були вищими через формування застійних зон у задній частині решіт. Натомість вентиляція із двозонним розподілом тиску (спереду більший, ззаду знижений) забезпечувала плавне виведення дрібнодисперсних частинок без підриву важких зернин. Найкращий результат показала конфігурація, де швидкість потоку становила 16–18 м/с у передній частині камери та 12–14 м/с у задній [8].

Окремо було підтверджено ефективність нахилу решітного блока на 5–6° у бік напрямку руху комбайна, що сприяло зменшенню зон скупчення вороху й знижувало ймовірність «провалювання» зерна разом із домішками. Умовно ідеальний режим очищення (мінімальні втрати, мінімальні домішки) моделювався при:

– частоті коливань решіт – 5 Гц,
– потоці повітря – 17,2 м/с,
– комбінованій перфорації з овальними отворами,
– швидкості подачі вороху – не вище 5 кг/с.

Загалом CFDDEM моделювання дало змогу ідентифікувати найчутливіші зони втрат у системі очищення, спрогнозувати ефективність конструктивних змін без затратного польового випробування та визначити параметри, які є критичними для зниження втрат зерна під час сепарації.

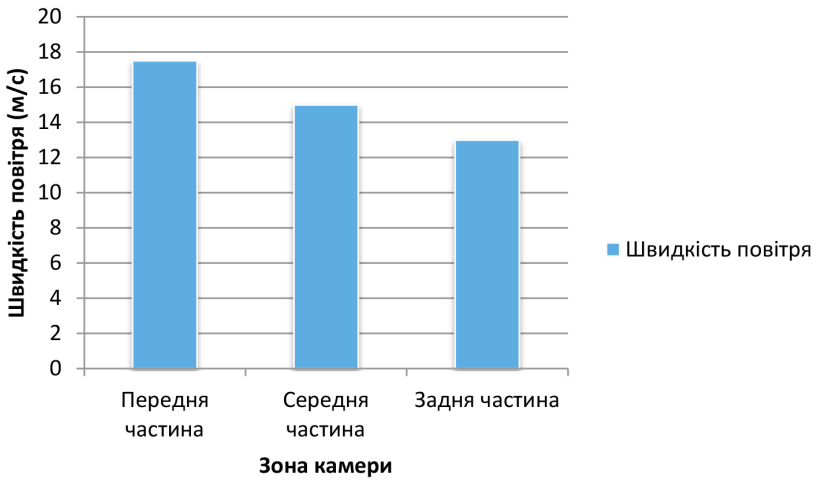


Рис. 2. Схема аеродинамічного розподілу повітря в зоні очищення при моделюванні (CFDDEM)

Аналіз рисунка 1 демонструє суттєву ефективність диференційованої вентиляції вздовж очисної камери. Найвища швидкість повітря – 17,5 м/с – у передній частині решітної площини забезпечувала швидке виведення легких домішок, тоді як зниження швидкості до 13,0 м/с у задній частині сприяло утриманню кондиційного зерна на решетах. Такий градієнт аеропотоку мінімізував турбулентність і запобігав виносу важких фракцій, що є ключовим для зниження втрат без зниження продуктивності.

Ця модель також підтвердила ефективність оптимізованого нахилу решіт та комбінації отвірних структур, що дозволяють стабілізувати рух зерна і полегшити його розділення від домішок. У сукупності ці параметри формують умовно ідеальний повітряно-механічний режим очищення, який не потребує повної перебудови системи, але може бути реалізований шляхом регулювань або часткової модернізації.

Висновки

Проведене теоретико-експериментальне дослідження впливу технічного стану машинно-тракторного парку на рівень втрат зерна пшениці під час очищення вороху в умовах фермерських господарств дало змогу встановити ключові чинники ефективності очисних систем. Показано, що найнижчі втрати зерна зафіксовано при експлуатації техніки з повністю автоматизованим регулюванням режимів очищення, зокрема в комбайні *John Deere 9500*, де втрати не перевищували 0,62 %. У техніці з частковою модернізацією (*Claas Lexion 450*) рівень втрат становив

1,18 %, тоді як у зношеній машині без автоматизації (*СК-5 «Нива»*) втрати досягали 2,83 %, що вказує на пряму залежність між технічним станом і втратами.

Експериментальні дані підтвердили зростання втрат із підвищенням інтенсивності подачі вороху. Найбільш виражена негативна динаміка зафіксована при перевищенні порогу 5 кг/с, особливо у техніці без адаптивного регулювання. Установлено, що збереження втрат на мінімальному рівні можливе за подачі в межах 3–4 кг/с та стабільного вентиляторного режиму.

Дослідження практичних режимів налаштування очисних систем показало, що оптимальними є поєднання середньої швидкості обдуву (16–18 м/с), частоти коливань решіт 4–5 Гц і геометрії отворів комбінованого типу. Результати CFDDEM моделювання підтвердили ефективність диференційованого розподілу повітряного потоку вздовж решітної площини, що сприяє селективному поділу зерна й домішок. Найкращий ефект досягнуто при зниженні швидкості повітря від передньої до задньої частини очисної камери. Встановлено високу ефективність використання сенсорних систем моніторингу втрат у режимі реального часу. Похибка таких систем порівняно з традиційним масово-ваговим методом становила не більше 0,12–0,17 %, що дозволяє використовувати їх як інструмент оперативного коригування режимів очищення. Це особливо актуально для фермерських господарств, де кожна відсоткова частка збереженого врожаю має економічне значення.

На основі отриманих результатів сформульовано практичні рекомендації щодо зниження втрат без значних капіталовкладень: дотримання допустимих параметрів подачі, регулярне регулювання решіт, часткове оновлення елементів обдуву, впровадження базових сенсорних систем і вдосконалення решітної геометрії. Застосування зазначених заходів дозволяє зменшити втрати зерна в системі очищення на 0,7–1,5 % навіть без заміни техніки, що є ефективним шляхом підвищення продуктивності машинно-тракторного парку в умовах фермерських господарств.

Список використаної літератури

1. Gao J., Duan Y., et al. Study on the technologies of loss reduction in wheat mechanization harvesting: A review. Agriculture. 2022. URL: https://www.mdpi.com/2077-0472/12/11/1935?utm_source

2. Tihanov G. T., Hristova G., Dallev M., Mitkov I. Loss of grain at harvesting wheat with a combine harvester. Scientific Papers Series A. Agronomy. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/355095034_LOSS_OF_GRAIN_AT_HARVESTING_WHEAT_WITH_A_COMBINE_HARVESTER

3. Kurbanov A. Z., Tursunov S. Ch., Mukimova F., Rajapova D. A. Research of the process of threshing bread mass and cleaning the grain using small scale thresher and cleaner. International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. 2019. URL: https://www.ijarset.com/upload/2019/december/17-Shakhloobloklova-10.pdf?utm_source

4. Jalal Al-Sammarraie M. A., Alhadithi S. A. Determination of grain losses on combine harvester. JSAER. 2021. URL: https://jsaer.com/download/vol-8-iss-1-2021/JSAER2021-8-1-196-202.pdf

5. Beck's Hybrids. Steps to prevent harvest loss: Combine settings and preventative maintenance. Agronomy Talk Update. 2024. 23 вересня. URL: https://www.beckshybrids.com/resources/agronomy-talk/steps-to-prevent-harvest-loss-combine-settings-and-preventative-maintenance

6. Chai T., et al. Modeling and control methods of a multi parameter system for automatic sieve adjustment reducing grain cleaning loss by about 30 %. Journal of Agricultural Engineering. 2024. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169924006422?utm_source

7. Zhu Z., Chai X., Xu L., Quan L., Yuan C., Weng S., Cao G., Jiang W. Research on predictive control of a novel electric cleaning system for combine harvester based on data-driven. Computers and Electronics in Agriculture. 2025. Vol. 232. Article 110075. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.110075

8. Wang L., Chai X., Huang J., Hu J., Cui Z. Efficient and low-loss cleaning method for non-uniform distribution of threshed materials based on multi-wing curved combination air screen in computational fluid dynamics/discrete element method simulations. Agriculture. 2024. Vol. 14, No. 6. Article 895. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture14060895

9. Qu Z., Lu Q., Shao H., Le J., Wang X., Zhao H., Wang W. Design and test of a grain cleaning loss monitoring device for wheat combine harvester. Agriculture. 2024. Vol. 14, No. 5. Article 671. URL: https://www.mdpi.com/2077-0472/14/5/671?utm_source

10. Nath B., Chen G., O'Sullivan C. M., Zare D. Research and technologies to reduce grain postharvest losses: A review. Foods. 2024. Vol. 13, No. 12. Article 1875. DOI: https://doi.org/10.3390/foods13121875

11. Ahamed S., Hossain M. J., Ali M. R., Saha C. K., Hussain M. M., Ali M. Y., Rahman A., Alam M. M. Modeling of a combine harvester speed for reducing harvesting loss of paddy. Smart Agricultural Technology. 2025. Vol. 3. P. 109. DOI: https://doi.org/10.1007/s44279-025-00297-2

12. Jotautiene E., Juostas A., Atilgan A. Investigation on environmentally friendly wheat harvest technology. Proceedings of the 23rd International Scientific Conference Engineering for Rural Development (22–24 May 2024, Jelgava, Latvia). – Jelgava: Latvia University of Life Sciences and Technologies, 2024. URL: https://www.iitf.lbtu.lv/conference/proceedings2024/Papers/TF049.pdf

13. South Dakota State University Extension. Combine adjustments to reduce harvest losses (S 0003 37 Corn Extension Bulletin). – 2019. – URL: https://extension.sdstate.edu/sites/default/files/2019-09/S-0003-37-Corn.pdf

14. Chen X., He X., Wang W., Qu Z., Liu Y. Study on the technologies of loss reduction in wheat mechanization harvesting: A review. Agriculture. 2022. Vol. 12, No. 11. Article 1935. URL: https://www.mdpi.com/2077-0472/12/11/1935

References

1. Gao, J., Duan, Y., et al. (2022). Study on the technologies of loss reduction in wheat mechanization harvesting: A review. *Agriculture*. Retrieved from: https://www.mdpi.com/2077-0472/12/11/1935?utm_source

2. Tihanov, G. T., Hristova, G., Dallev, M., & Mitkov, I. (2021). Loss of grain at harvesting wheat with a combine harvester. *Scientific Papers Series A. Agronomy*. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/355095034_LOSS_OF_GRAIN_AT_HARVESTING_WHEAT_WITH_A_COMBINE_HARVESTER

3. Kurbanov, A. Z., Tursunov, S. Ch., Mukimova, F., & Rajapova, D. A. (2019). Research of the process of threshing bread mass and cleaning the grain using smallscale thresher and cleaner. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. Retrieved from: https://www.ijarset.com/upload/2019/december/17-Shakhloobloklova-10.pdf?utm_source

4. Jalal Al-Sammarraie, M. A., Alhadithi, S. A. (2021). Determination of grain losses on combine harvester. *JSAER*. Retrieved from: https://jsaer.com/download/vol-8-iss-1-2021/JSAER2021-8-1-196-202.pdf

5. Beck's Hybrids. (2024). Steps to prevent harvest loss: Combine settings and preventative maintenance. *Agronomy Talk Update*, September 23. Retrieved from: https://www.beckshybrids.com/resources/agronomy-talk/steps-to-prevent-harvest-loss-combine-settings-and-preventative-maintenance

6. Chai, T., et al. (2024). Modeling and control methods of a multiparameter system for automatic sieve adjustment reducing grain cleaning loss by about 30 %. *Journal of Agricultural Engineering*. Retrieved from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169924006422?utm_source

7. Zhu, Z., Chai, X., Xu, L., Quan, L., Yuan, C., Weng, S., Cao, G., & Jiang, W. (2025). Research on predictive control of a novel electric cleaning system for combine harvester based on data-driven. *Computers and Electronics in Agriculture*, 232, 110075. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.110075

8. Wang, L., Chai, X., Huang, J., Hu, J., & Cui, Z. (2024). Efficient and low-loss cleaning method for non-uniform distribution of threshed materials based on multi-wing curved combination air screen in computational fluid dynamics/discrete element method simulations. *Agriculture*, 14(6), 895. https://doi.org/10.3390/agriculture14060895

9. Qu, Z., Lu, Q., Shao, H., Le, J., Wang, X., Zhao, H., & Wang, W. (2024). Design and test of a grain cleaning loss monitoring device for wheat combine harvester. *Agriculture*, 14(5), 671. Retrieved from: https://www.mdpi.com/2077-0472/14/5/671?utm_source

10. Nath, B., Chen, G., O'Sullivan, C. M., Zare, D. (2024). Research and technologies to reduce grain postharvest losses: A review. *Foods*, 13(12), P. 1875. https://doi.org/10.3390/foods13121875

11. Ahamed, S., Hossain, M. J., Ali, M. R., Saha, C. K., Hussain, M. M., Ali, M. Y., Rahman, A., Alam, M. M. (2025). Modeling of a combine harvester speed for reducing harvesting loss of paddy. *Smart Agricultural Technology*, 3, P. 109. https://doi.org/10.1007/s44279-025-00297-2

12. Jotautiene, E., Juostas, A., & Atilgan, A. (2024, May 22–24). Investigation on environmentally friendly wheat harvest technology. In *Proceedings of the 23rd International Scientific Conference Engineering for Rural Development* (Jelgava, Latvia). Latvia University of Life Sciences and Technologies. Retrieved from: https://www.iitf.lbtu.lv/conference/proceedings2024/Papers/TF049.pdf

13. South Dakota State University Extension. (2019). *Combine adjustments to reduce harvest losses* (*S000337 Corn Extension Bulletin*). Retrieved from: https://extension.sdstate.edu/sites/default/files/2019-09/S-0003-37-Corn.pdf

14. Chen, X., He, X., Wang, W., Qu, Z., & Liu, Y. (2022). Study on the technologies of loss reduction in wheat mechanization harvesting: A review. *Agriculture*, 12(11), 1935. Retrieved from: https://www.mdpi.com/2077-0472/12/11/1935

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 27.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 621.397:004.076.4 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.24

В. М. ОРЕЛ
кандидат технічних наук,
докторант кафедри механічної інженерії
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID: 0000-0002-8775-3253

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА В ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМАХ

У даній роботі наведено результати аналізу науково-літературних джерел та існуючих технологій механічної обробки деталей, виготовлених методом адитивного виробництва, зокрема моделювання плавленим осадженням (FDM). Недостатня якість поверхні та низька точність геометричних розмірів є одними з ключових проблем, що обмежують застосування 3D-друкованих компонентів у високотехнологічних галузях, Тому розробка ефективних методів постобробки є актуальним напрямом для інтеграції адитивного виробництва в інженерні системи. Механічна обробка (фрезерування, точіння, шліфування) розглядається як перспективний підхід для вирішення цієї проблеми, оскільки дозволяє значно підвищити точність розмірів, якість поверхні та покращити такі функціональні характеристики, як зносостійкість і втомна міцність. Встановлено, що процес механічної обробки FDM-виробів має суттєві особливості, пов'язані з їхньою шаруватою структурою та анізотропією механічних властивостей. На відміну від суцільних матеріалів, у 3D-друкованих деталях найслабшим місцем є міжшарові з'єднання, що створює ризик розшарування (деламінації) під дією ріжучого інструменту, особливо при обробці перпендикулярно до шарів. Іншими важливими факторами є концентрація напружень у вузлах контакту між волокнами та тепловий вплив, який може ослаблювати адгезійні зв'язки. Існуючі альтернативні методи, як-от хімічне згладжування, хоча й ефективні для покращення поверхні, можуть призводити до значного (32–35 %) зниження міцності деталей. Згідно з проведеним аналізом, для забезпечення прогнозованої якості обробки та збереження цілісності виробу запропоновано підхід, що базується на математичному моделюванні процесу лезового різання. Модель враховує шарувату структуру матеріалу, сили міжшарової адгезії, розподіл нормальних та зсувних напружень, а також температурну залежність міцності з'єднань. Вибір оптимальних параметрів обробки (подача, глибина різання, швидкість) має ґрунтуватися на умові, за якої напруження зрізу матеріалу не перевищуватимуть міцність міжшарових зв'язків, що дозволить уникнути дефектів та забезпечити надійність кінцевого продукту.

Ключові слова: *адитивне виробництво, FDM, механічна обробка, якість поверхні, шорсткість, міжшарова адгезія, концентрація напружень, розшарування.*

V. M. OREL
PhD of Technical Sciences,
Doctoral Student at the Department of Mechanical Engineering
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID: 0000-0002-8775-3253

ANALYSIS OF MECHANICAL PROCESSING TECHNOLOGIES FOR ADDITIVE MANUFACTURING PARTS IN ENGINEERING SYSTEMS

This paper presents the results of an analysis of scientific and literary sources and existing technologies for the mechanical processing of parts manufactured using additive manufacturing, in particular fused deposition modeling (FDM). Insufficient surface quality and low geometric accuracy are among the key problems limiting the use of 3D-printed components in high-tech industries. Therefore, the development of effective post-processing methods is a relevant direction for the integration of additive manufacturing into engineering systems. Mechanical processing (milling, turning, grinding) is considered a promising approach to solving this problem, as it allows for a significant increase in dimensional accuracy and surface quality, as well as improvements in functional characteristics such as wear resistance and fatigue strength. It has been established that the process of mechanical processing of FDM products has significant features related to their layered structure and anisotropy of mechanical properties. Unlike solid materials, the weakest point in 3D-printed parts is the interlayer connections, which creates a risk of delamination under the action of a cutting tool, especially when machining perpendicular to the layers. Other important factors are stress concentration at the contact points between fibers and thermal effects, which can weaken adhesive bonds. Existing alternative methods, such as chemical smoothing, although effective for improving the surface, can lead to a significant (32–35 %) reduction in the strength of parts. According to the analysis, an approach based on mathematical modeling of the blade cutting process

© Орел В. М., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

is proposed to ensure the predicted quality of processing and preserve the integrity of the product. The model takes into account the layered structure of the material, interlayer adhesion forces, the distribution of normal and shear stresses, as well as the temperature dependence of the strength of the joints. The selection of optimal processing parameters (feed, cutting depth, speed) should be based on the condition that the shear stress of the material does not exceed the strength of the interlayer bonds, which will avoid defects and ensure the reliability of the final product.

Key words: *additive manufacturing, FDM, machining, surface quality, roughness, interlayer adhesion, stress concentration, delamination.*

Постановка проблеми

Механічна обробка виробів інженерного призначення виготовлених методом моделювання плавленим осадженням (FDM) (Рис. 1) є необхідною частиною адитивного виробництва для забезпечення встановлених показників якості поверхні, точності геометричних розмірів 3D-надрукованих компонентів. FDM – це широко використовуваний метод адитивного виробництва; в ньому об’єкти створюються шляхом нанесення термопластичних матеріалів пошарово з екструдера – результатом цього можуть бути шарувата структура виробу. Одним з шляхів отримання виробу необхідної якості поверхонь є використання методів механічної обробки (фрезерування, точіння, шліфування або свердлування). Це сприяло зменшення розриву між адитивним виробництвом та традиційними методами виготовлення [1], [2].

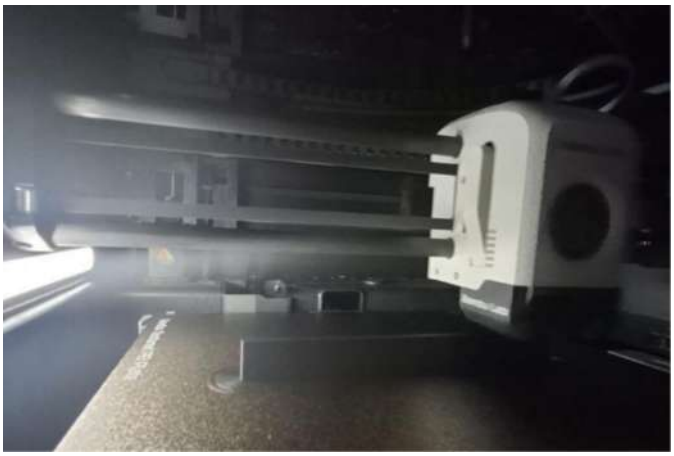


Рис. 1. Процес FDM друку

Значення механічного оброблення в технологіях FDM полягають у їх здатності вирішувати проблеми якості та розмірів поверхні, які можуть заважати використанню деталей 3D-друку у різних сферах промисловості. Галузі такі як аерокосмічна (рис. 2), автомобільна та медична індустрія все більше спираються на FDM-технологію для створення високоефективних компонентів для досягнення високих стандартів якості [3] [4].

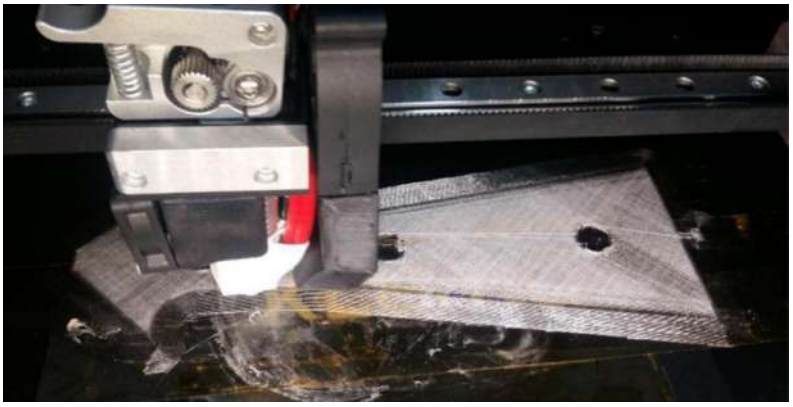


Рис. 2. Друк оснащення для аерокосмічного виробництва

Механічне оброблення не тільки підвищують поверхневу якість виробу, але й підвищують функціональні характеристики, такі як зносостійкість і втомна міцність, що робить оброблені FDM деталі придатними для складних застосувань [5].

Механічна обробка надає численні переваги, але водночас створює проблеми, з якими виробники повинні враховувати. Такі проблеми, як знос інструменту, складність програмування та витрати на технічне обслуговування, можуть ускладнити ефективність та результативність операцій обробки. Крім того, вибір матеріалів суттєво впливає на якість механічної обробки, що вимагає від виробників врахування цих факторів в технологічних процесах [6], [7].

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є аналіз сучасних технологій обробки деталей виготовлених адитивних методів з урахуванням щільності структури та взаємодії між різними шарами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

FDM – одна з найпоширеніших технологій адитивного виробництва, визнана завдяки широкому вибору матеріалів, точності друку, повторюваності та довговічності. Процес включає екструзію термопластичних полімерів через нагріте сопло, де матеріал наноситься шар за шаром, створюючи тривимірний об'єкт. Ця технологія зробила революцію дозволивши виробляти деталі, які мають механічні властивості, подібні до тих, що виготовляються традиційними методами, такими як лиття під тиском, особливо з таких матеріалів, як ULTEM, Antero та Nylon 12 CF [8] [9]. Здатність виготовляти високопродуктивні деталі робить її придатною для застосування в широкому діапазоні – від компонентів інтер'єру літаків до промислових пристосувань і пристроїв. Універсальність матеріалів, що використовуються в FDM, дозволяє виробникам досягати бажаних механічних властивостей і адаптувати компоненти до конкретних потреб. Наприклад, компанія, що виробляє медичне обладнання, може використовувати FDM для створення індивідуальних протезів, оптимізованих для комфорту пацієнта [10] [11].

FDM має кілька переваг, які сприяють його популярності в сучасному виробництві, а саме.

Економічна ефективність: Використання відносно недорогих термопластичних ниток робить FDM варіантом для створення прототипів і дрібносерійного виробництва. Ця доступність поширюється як на початкові інвестиції, так і на матеріальні витрати [12].

Різноманітність матеріалів: широкий асортимент термопластів, включаючи акрилонітрил-бутадієн-стирол (ABS), полімолочну кислоту (PLA), поліетилентерефталатгліколь (PETG), а також матеріали інженерного класу, такі як нейлон і полікарбонат, розширює можливості застосування FDM. Спеціалізовані нитки, в тому числі композити, армовані вуглецевим волокном, ще більше розширюють можливості технології [13] [14].

Швидке створення прототипів: FDM дозволяє здійснювати швидкі та індивідуальні конструкції. Процес пошарового осадження зводить до мінімуму потребу в опорних конструкціях, зменшуючи відходи матеріалу і спрощуючи механічну обробку [15] [16].

Виготовлені деталі мають видимі лінії розшарування і потребують механічної обробки для досягнення бажаної якості поверхні. Такі методи, як шліфування та нанесення покриття, можуть покращити зовнішній вигляд, але можуть вимагати значного додаткового часу та ресурсів [17] [18]. Крім того, хоча міцність деталей, виготовлених методом FDM, може бути придатною для багатьох застосувань, вона може не відповідати характеристикам компонентів, виготовлених за допомогою традиційного лиття під тиском, через пористість, притаманну пошаровим структурам [19] [20].

Механічна обробка інженерних деталей, виготовлених методом FDM, необхідна для підвищення загальної продуктивності та якості деталей, які часто мають видимі лінії розшарування та шорсткуваті поверхні відразу після друку (рис. 3).



Рис. 3. Видима шаруватість поверхні друкованого виробу

Механічне полірування – це широко застосовуваний метод обробки поверхні, який використовує абразивні інструменти, такі як полірувальні круги, стрічки або диски. Цей метод ефективно видаляє матеріал з поверхні 3D-друкованої деталі. Процес може виконуватися вручну або за допомогою автоматизованого обладнання, а вибір абразивних матеріалів і параметрів полірування має вирішальне значення для досягнення бажаної якості поверхні [21].

Шліфування – ще один поширений метод постобробки, який використовується для згладжування шорстких поверхонь на 3D-друкованих деталях. Цей метод передбачає використання абразивних матеріалів, для усунення ліній розшарування та дефектів поверхні. Зазвичай процес шліфування починається з грубозернистого інструменту для усунення великих дефектів і переходить до більш дрібної зернистості (рис. 4).



а) б)

Рис. 4. 3-D друкований виріб: а) до шліфування; б) після механічної обробки

Хімічне згладжування особливо корисне для деталей FDM, виготовлених з ABS-пластика. Цей процес передбачає вплив на надруковану деталь розчинника, наприклад, ацетону, який розчиняє зовнішній шар матеріалу, що призводить до більш гладкої поверхні (рис. 5) [22].



Рис. 5. Результат хімічного згладжування 3-D друкованого виробу

Шорсткість поверхні одним з параметрів, який визначає функціональні властивості готових виробів. Аналіз шорсткості розглядається у двох напрямках: уздовж шару та перпендикулярно до шару.

Уздовж шару шорсткість зумовлена нерівномірністю товщини нитки екструзії та її осіданням під час охолодження. Основні фактори, які впливають на цей тип шорсткості:

Товщина шару: Зменшення висоти шару покращує якість поверхні, але збільшує тривалість друку.

Рівність ниток: Неточності в накладанні ниток призводять до появи мікротріщин і проміжків між сусідніми нитками.

Температура екструзії: Оптимальна температура забезпечує краще зчеплення між нитками та мінімізує дефекти.

Швидкість друку: Висока швидкість може спричиняти хвилеподібні нерівності через недостатню стабілізацію матеріалу.

Шорсткість перпендикулярно до шару є результатом ступінчастої структури поверхні, яка виникає через дискретну природу формоутворення. Основні причини:

Висота шару: Чим більша висота шару, тим помітніший «ефект сходинок», особливо на похилих або криволінійних поверхнях.

Кут нахилу поверхні: На поверхнях, розташованих під кутом до осі друку, шорсткість значно вища через більшу відстань між рівнями шарів.

Адгезія між шарами: Недостатня адгезія може спричиняти нерівності та осипання верхніх шарів.

Параметри шорсткості приведені в таблиці.

Таблиця 1

Аналіз показників шорсткості

Напрямок	Висота шару, мм	Показник шорсткості, Ra мкм	Хімічна обробка, Ra мкм	Шліфування, Ra мкм	Різання, Ra мкм
Шорсткість перпендикулярно до шару	0,1	10–15	1–2	2–3,5	3–5
	0,2	20–30	1–2,5	4–6	5–7
	0,3	35–30	2–3	8–10	10–12
Шорсткість уздовж шару	0,1	20–25	1–2,5	2–3,5	3–5
	0,2	40–50	2–3	4–6	5–7
	0,3	60–10	3–5	8–10	10–12

Окрім параметрів шорскості необхідно враховувати значний вплив хімічної обробки на механічні властивості, при тривалому впливі понад 3 години зниження міцності складає 32–35 % від початкових значень.

Для 3D-друкованих деталей часто застосовується обробка з ЧПК для досягнення точної обробки поверхні та дотримання допусків на розміри. Зазвичай використовуються такі методи, як фрезерування, точіння та шліфування. Фрезерування з ЧПК є особливо вигідним для створення складних елементів, таких як отвори та кишені, тоді як токарні операції вдосконалюють циліндричні компоненти [23].

Гібридні виробничі процеси поєднують 3D-друк з обробкою з ЧПУ для підвищення гнучкості дизайну та ефективності виробництва. Цей метод починається з 3D-друку полімерного базового шару, за яким слідує механічна обробка з ЧПК для доопрацювання деталі. Такий підхід не лише прискорює виробництво, але й дозволяє створювати складні геометричні форми, яких важко досягти лише традиційними методами.

Механічні властивості матеріалу, що розрізається, відіграють важливу роль у якості процесу різання. Наприклад, товщина і деформаційні характеристики впливають на те, як вони реагують на техніку різання. Використання правильної висоти ріжучої кромки та підтримання оптимальної швидкості машини мають вирішальне значення для мінімізації утворення задирок і забезпечення чистоти різу [24]. Крім того, такі фактори, як орієнтація друку 3D-зразків, можуть впливати на їхню механічну цілісність, що, в свою чергу, впливає на якість різання [25].

Точність має вирішальне значення для деталей, спроектованих за технологією FDM, оскільки навіть незначні відхилення можуть призвести до значних перекосів, що впливають на продуктивність і функціональність кінцевого продукту. Передові технології, такі як лазерне різання та обробка з ЧПК, застосовуються для того, щоб гарантувати, відповідність заданим розмірам з високою точністю [26]. Фінішна обробка – важливий етап, який суттєво впливає на кінцеву якість вирізаних деталей. Згладжування країв дрібнозернистим наждачним папером допомагає усунути будь-які шорсткості, які можуть призвести до проблем під час складання або монтажу. Регулярна перевірка зрізів також необхідна для того, щоб забезпечити своєчасне усунення будь-яких нерівностей, що підвищує загальну якість виготовлених деталей [27].

Механічна обробка має кілька значних переваг при застосуванні до інженерних деталей, виготовлених методом моделювання плавленим осадженням (FDM), підвищуючи їх продуктивність і придатність для різних застосувань.

Однією з основних переваг механічної обробки є підвищення точності розмірів деталей FDM. Під час процесу FDM-друку такі фактори, як усадка матеріалу та діаметр сопла, можуть призвести до розбіжностей у розмірах. Механічні методи подальшої обробки, такі як фрезерування або механічна обробка, можуть уточнити ці розміри, гарантуючи, що деталі точно прилягають до інших компонентів і відповідають суворим вимогам допуску [28].

Механічна обробка також може оптимізувати механічні властивості компонентів FDM. Застосовуючи такі методи, як шліфування та хімічне згладжування, користувачі можуть підвищити твердість, зносостійкість та втомну міцність. Така оптимізація особливо корисна для деталей, призначених для високопродуктивного застосування в таких галузях, як аерокосмічна та автомобільна промисловість, де механічна цілісність має першорядне значення [29].

Інтеграція механічної обробки в робочий процес FDM полегшує швидку індивідуалізацію конструкцій. З'являється можливість змінювати та вдосконалювати деталі після друку, що дозволяє їм швидко адаптуватися до мінливих вимог або підвищити ефективність проектування. Така адаптивність має важливе значення в галузях, де пріоритетом є швидке створення прототипів і розробка продуктів [30].

Механічна обробка може сприяти зменшенню відходів матеріалів, пов'язаних з деталями FDM. Наприклад, методи, які дозволяють видаляти надлишки матеріалу з опорних конструкцій, можуть призвести до більш ефективного використання матеріалів. Крім того, точність, яку забезпечує механічна обробка, зводить до мінімуму необхідність повторного друку через помилки в розмірах, що ще більше економить ресурси.

Ще однією важливою проблемою є обмеження, пов'язані зі спеціалізованими матеріалами. Наприклад, хоча такі матеріали, як ABS, пропонують підвищену довговічність і механічну міцність, їхні виробничі процеси є енергоємними і залежать від ресурсів на нафтовій основі. Ця залежність збільшує їхній вплив на навколишнє середовище і ускладнює бюджетні міркування, що робить ABS більш придатним для проектів, де його міцність виправдовує екологічні та фінансові компроміси [31].

На противагу цьому, PLA є більш екологічною альтернативою, але може не мати такого ж рівня механічної міцності, який необхідний для певних застосувань, що підкреслює необхідність ретельного вибору матеріалу на основі вимог проекту [32].

Однією з важливих проблем, пов'язаних з обробкою FDM, є складність програмування, необхідного для обробки з ЧПК. Помилки в програмуванні можуть призвести до дорогих помилок, марних витрат матеріалів і затримок у виробництві, що додає ще один рівень складності до процесу.

Знос інструменту є серйозною проблемою при обробці деталей FDM. Такі фактори, як невідповідна швидкість подачі, твердість матеріалу та недостатнє охолодження, можуть призвести до надмірного зносу інструменту, що впливає на тривалість циклу та якість деталі. Регулярні перевірки та коригування швидкості подачі необхідні для мінімізації цих проблем.

Викладення основного матеріалу дослідження

Враховуючи існуючі проблеми виникає необхідність формування методики механічного обробнуння обєктів виготовлених методом пошарового наплавлення, які дозволять забезпечити якість та прогнозованість оброблюваної поверхні зі збереженням механічних властивостей (на відміну від хімічної обробки). Основою такої методики є математична модель, що дозволяє провести опис процесу з урахуванням параметрів (подачі, глибини різання, швидкості обертання шпинделя). В основу такої моделі необхідно покласти шаруватий матеріал, окремий шар якого складають з окремих волокон (рис. 6).

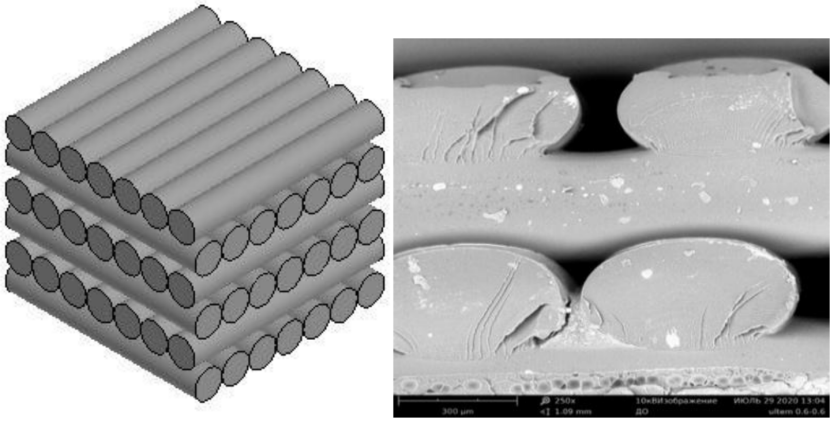


Рис. 6. Структура для аналізу

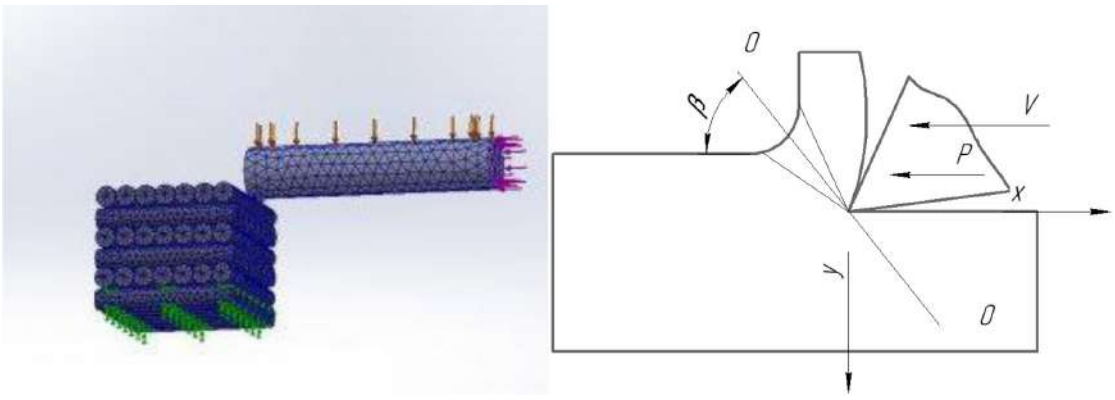


Рис. 7. Схема взаємодій лезійного інструменту з FDM-виробом

Процес лезвійного різання виробів, виготовлених методом FDM, має свої особливості через шарувату структуру матеріалу, анізотропність його механічних властивостей та наявність міжшарових з'єднань, які можуть бути слабшим місцем (рис. 7). Для адекватного опису цього процесу необхідно враховувати механічні та теплові характеристики матеріалу, властивості ріжучого інструменту та умови різання.

При різанні лезо взаємодіє з шаруватим матеріалом, створюючи три зони:

Зона пружної деформації, де матеріал піддається напруженням без порушення зв'язків.

Зона пластичної деформації, у якій відбувається локальна деформація полімерного матеріалу перед руйнуванням.

Зона руйнування, де матеріал відділяється у вигляді стружки або частково розшаровується через недостатню міжшарову адгезію.

Критичним фактором є напрямок укладання шарів FDM-деталі відносно руху леза:

Різання вздовж шарів спричиняє утворення довгої стружки та рівномірний зріз.

Різання перпендикулярно до шарів призводить до розшарування через слабку адгезію між ними.

В процесі різання лезо взаємодіє з матеріалом, створюючи зону контакту, яка характеризується:

– товщиною шарів, сформованих під час 3D-друку;
– напрямком укладання шарів та їх орієнтацією відносно ріжучої кромки;
– величиною зазору між шарами, що впливає на зчеплення між ними.

Кут нахилу ріжучої кромки відносно орієнтації шарів визначає механізм руйнування матеріалу: при невеликому куті домінує зріз шарів, а при більшому – розшарування виробу через недостатню адгезію між шарами.

Модель, повина враховувати:

– Анізотропну будову шаруватих виробів та нерівномірний розподіл механічних властивостей,
– Механізми руйнування як самого матеріалу, так і міжшарових зв'язків,
– Вплив тертя та нагрівання на міцність адгезії.

Анізотропія та шарова структура:

FDM-вироби характеризуються анізотропією, тобто їх механічні властивості залежать від напрямку навантаження, де кожен шар може мати різну міцність, а міжшарові зв'язки є критичними для загальної міцності виробу. Модель враховує цю анізотропію через введення площі контакту між шарами A_s та відповідних напружень.

Механізми руйнування:

Включають механічний розрив матриці та зсувне руйнування між компонентами. У запропонованій моделі це відображено через два основних компоненти: сила, необхідна для зрізу матеріалу та сила, необхідна для подолання міжшарової адгезії. Розшарування відбувається, коли зсувне напруження перевищує критичне значення, що узгоджується з аналізом механізмів руйнування в обробці композитів.

Тепловий вплив:

Виділення тепла під час різання є ще одним важливим фактором. Нагрівання може вплинути на адгезійні властивості, знижуючи коефіцієнт адгезії і тим самим полегшуючи розшарування. Включення температурної залежності дозволяє моделювати цей ефект і оптимізувати параметри різання для зменшення небажаного руйнування міжшарових зв'язків.

При різанні шаруватого матеріалу виникають напруження у зоні контакту ріжучої кромки з матеріалом, які можна розділити на:

- нормальні напруження (σ), що виникають при проникненні леза в матеріал,
- зсувні напруження (τ), що визначають процес відокремлення матеріалу та можливість руйнування міжшарових з'єднань.

Загальний розподіл напружень у матеріалі описується співвідношеннями:

$$\sigma_x = \frac{F_{c,x}}{A_c}, \quad \sigma_y = \frac{F_{c,y}}{A_c}, \quad \sigma_z = \frac{F_{c,z}}{A_c},$$

де A_c – площа контакту ріжучої кромки з матеріалом, а F_c – сила різання.

Окрім основного матеріалу, особливу увагу слід приділити міжшаровій адгезії, яка визначає міцність зчеплення між шарами. Для цього вводиться сила адгезії:

$$F_{adh} = k_{adh} \cdot A_s \cdot \left(1 - \frac{T_{crit} - T_{bond}}{T_{crit} - T_{\min}}\right),$$

де k_{adh} – коефіцієнт адгезії, A_s – площа контакту між шарами.

Якщо зсувні напруження між шарами перевищують межу адгезії, відбувається розшарування виробу:

$$\tau \le \tau_{adh}.$$

Таким чином, якщо лезо діє в напрямку, перпендикулярному до шарів, можливе розривання міжшарових зв'язків ще до механічного руйнування самого матеріалу.

Процес різання супроводжується виділенням тепла через тертя між лезом та матеріалом. Це тепло може призводити до зміни механічних властивостей матеріалу та ослаблення адгезійних зв'язків. Тепловий вплив можна описати рівнянням:

$$Q = W_c \cdot \eta.$$

Де W_c – робота різання, η – коефіцієнт перетворення механічної енергії в тепло.

Залежність міжшарової адгезії від температури можна виразити у вигляді експоненційної залежності:

$$k_{adh}(T) = k_{adh_0} \cdot \exp\left(-\frac{T - T_{bond}}{T_{char}}\right),$$

де T_{char} – характеристична температура розпаду адгезійних зв'язків.

При перевищенні критичної температури T_{crit} можливе плавлення або термічне руйнування адгезії, що значно полегшує процес розшарування.

Щоб оцінити ефективність різання та можливість розшарування виробу, необхідно виконання двох основних умов:

1. Міцність матеріалу $\sigma + \tau \leq \sigma_{ult}$

σ_{ult} – граничне напруження, при якому руйнується сам матеріал.

2. Міцність міжшарових зв'язків $\tau \leq \tau_{adh}$.

Якщо виконуються обидві умови, різання відбувається без розшарування, в іншому випадку – спостерігається розрив зв'язків між шарами та порушення структури виробу.

Лезвійне різання може викликати як механічне руйнування, так і міжшарове розшарування через слабку адгезію.

Необхідно враховувати розподіл сил та їхню взаємодію з напрямком друку.

Вплив температури може суттєво змінювати механізм різання через зміну адгезійних властивостей матеріалу.

Під час механічної обробки адитивно виготовлених деталей, значну увагу слід приділяти аналізу розподілу напружень у зоні контакту між шарами або волокнами. У цих вузлах контакту відбувається концентрація напружень.

Шарувата структура виробу призводить до неоднорідного розподілу матеріалу, що спричинює локальні нерівності в товщині шару, наявність мікродефектів або пустот. Такі неоднорідності створюють умови для локального підвищення напружень.

Зв'язок між шарами (або волокнами) недостатньо міцний, при діях зовнішніх навантажень напруження концентруються в місцях контакту, де виникає перевантаження і починається розшарування матеріалу.

Під час механічної обробки діють додаткові зсувні та нормальні сили, що можуть призводити до утворення локальних зон з високими значеннями напружень. Ці зони можуть стати початковими точками для ініціації мікротріщин або локальних руйнувань.

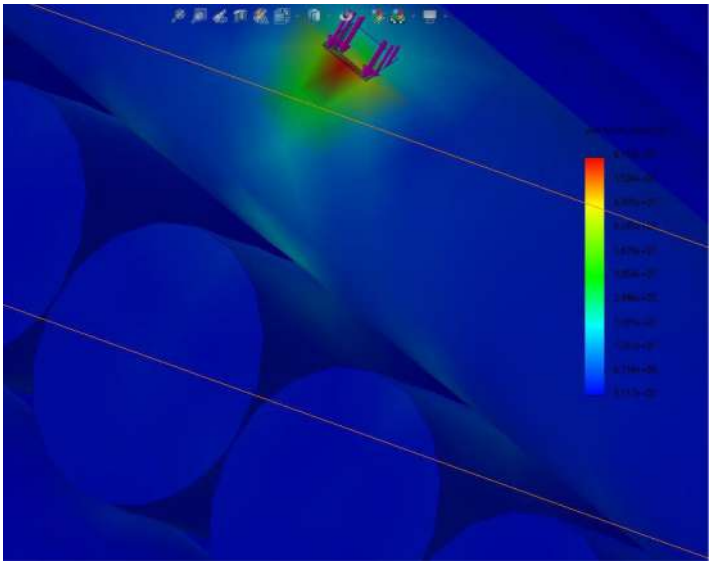


Рис. 8. Концентрація напружень в вузлах контакту між шарами (волокнами)

З урахуванням цих факторів можливо оптимізувати параметри різання для забезпечення якісної обробки FDM-компонентів.

Висновки

Оскільки виробники прагнуть масштабувати свої операції, адаптивність систем різання стає все більш важливою. Обладнання, яке відповідає сьогоднішнім потребам, також повинно бути здатним пристосовуватися до майбутніх типів матеріалів і виробничих потреб. Оцінка загальної вартості володіння, включаючи технічне обслуговування і масштабованість, має важливе значення для виробників, які прагнуть узгодити свої інвестиції з довгостроковими стратегіями зростання.

Сучасні технології адитивного виробництва, зокрема методи 3D-друку, активно застосовуються в авіаційній, автомобільній та інших високотехнологічних галузях. Особливості шарової будови виготовлених виробів створюють додаткові виклики під час їх механічної обробки, адже локальна концентрація напружень у зонах контакту між шарами або волокнами може призводити до дефектів, мікротріщин та зниження експлуатаційної надійності. Це робить дослідження розподілу напружень та механізмів руйнування в таких виробах надзвичайно важливими як з точки зору оптимізації процесів обробки, так і для забезпечення якості кінцевої продукції. Врахування сучасних підходів, зокрема чисельного моделювання методом кінцевих елементів та аналізу міжшарової адгезії, дозволяє глибше зрозуміти вплив технологічних параметрів на механічну поведінку виробів, що є критично важливим для інженерних систем.

Цілями спрямованими на підвищення ефективності та якості виробничих процесів, забезпечення надійності інженерних систем і розширення застосування адитивного виробництва в промисловості:

– Розробити та впровадити нові методики механічної обробки, які мінімізують локальне накопичення напружень у виробах з адитивною структурою.

– Визначити оптимальні параметри різання для збереження міжшарової адгезії.

– Розширити застосування методів для більш точного прогнозування розподілу напружень у різних режимах обробки.

– Розробити мультифізичні моделі, що враховують взаємодію механічних, термічних та хімічних процесів під час обробки адитивного виготовлених виробів.

– Провести серію експериментальних досліджень для визначення критичних параметрів міжшарової адгезії та локальних напружень.

Список використаної літератури

1. Guo, C., Liu, X., & Liu, G. (2021). Surface finishing of fdm-fabricated amorphous polyetheretherketone and its carbon-fiber-reinforced composite by dry milling. *Polymers*, 13(13), 2175. https://doi.org/10.3390/polym13132175

2. Bekas, D. G., Hou, Y., Liu, Y., & Panesar, A. J. C. P. B. E. (2019). 3D printing to enable multifunctionality in polymer-based composites: A review. *Composites Part B: Engineering*, 179, 107540.

3. Chen, T. C. T., & Lin, Y. C. (2019). A three-dimensional-printing-based agile and ubiquitous additive manufacturing system. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 55, 88–95., https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.07.008

4. Mohanavel, V., Ali, K. A., Ranganathan, K., Jeffrey, J. A., Ravikumar, M. M., & Rajkumar, S. J. M. T. P. (2021). The roles and applications of additive manufacturing in the aerospace and automobile sector. *Materials Today: Proceedings*, 47, 405–409. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.596

5. Орел В. М., Козловська Т. Ф., Саленко О. Ф., Мельничук П. П. Постоброблення виробів інженерного призначення, отриманих методами адитивного пошарового моделінгу. *Технічна інженерія*. 2025 №1(95). С. 76–93. https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-76-93

6. Guo, C., Liu, X., & Liu, G. (2021). Surface finishing of fdm-fabricated amorphous polyetheretherketone and its carbon-fiber-reinforced composite by dry milling. *Polymers*, 13, 2175. https://doi.org/10.3390/polym13132175

7. Bruni, C., Gianangeli, C., Mancia, T., Greco, L., & Pieralisi, M. (2020, April). Improving dimensional and surface quality of additive manufactured parts. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1507, No. 4, p. 042003). IOP Publishing. DOI 10.1088/1742-6596/1507/4/042003

8. Salenko, A. F., Derevianko, I. I., Samusenko, A. A., Avramov, K. V., Lithot, A. V., & Rogulin, V. V. (2021). Creation of sealed strong structures of rocket and space equipment FDM printing methods by ULTEM™ 9085 PEI plastic. *Mechanics and Advanced Technologies*. No. 3. 282–293.

9. Salenko, O., Zagirnyak, M., Orel, V., Shlyk, S., & Kulynych, V. (2022, October). FDM products strength increasing using the algorithmic means of 3-D printers working. *In 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (pp. 01–05). IEEE. doi:10.1109/MEES58014.2022.10005667

10. Borthakur, P. P. (2025). The Role and Future Directions of 3D Printing in Custom Prosthetic Design. *Engineering Proceedings*, 81(1), 10. https://doi.org/10.3390/engproc2024081010

11. Górski, F., Wichniarek, R., Kuczko, W., & Żukowska, M. (2021). Study on properties of automatically designed 3d-printed customized prosthetic sockets. *Materials*, 14(18), 5240. https://doi.org/10.3390/ma14185240

12. Darwish, L. R., El-Wakad, M. T., & Farag, M. M. (2021). Towards sustainable industry 4.0: A green real-time IIoT multitask scheduling architecture for distributed 3D printing services. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 196–209., https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.09.004

13. Gómez-Ortega, A., Piedra, S., Mondragón-Rodríguez, G. C., & Camacho, N. (2024). Dependence of the mechanical properties of nylon-carbon fiber composite on the FDM printing parameters. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 186, 108419. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108419

14. Patel, K. S., Shah, D. B., Joshi, S. J., Aldawood, F. K., & Kchaou, M. (2024). Effect of process parameters on the mechanical performance of FDM printed carbon fiber reinforced PETG. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 8006-8018. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.184

15. Fazzini, G., Paolini, P., Paolucci, R., Chiulli, D., Barile, G., Leoni, A.,... & Ferri, G. (2019, June). Print on air: Fdm 3d printing without supports. *In 2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4. 0&IoT)* (pp. 350–354). IEEE. doi: 10.1109/METROI4.2019.8792846

16. Wall, L. W., Schneider, O., & Vogel, D. (2023, October). Substiports: User-Inserted Ad Hoc Objects as Reusable Structural Support for Unmodified FDM 3D Printers. *In Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (pp. 1–20). https://doi.org/10.1145/3586183.3606718

17. Gao, T., Li, C., Yang, M., Zhang, Y., Jia, D., Ding, W.,... & Wang, J. (2021). Mechanics analysis and predictive force models for the single-diamond grain grinding of carbon fiber reinforced polymers using CNT nano-lubricant. *Journal of Materials Processing Technology*, 290, 116976. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116976

18. Aman, B. (2020). Generative design for performance enhancement, weight reduction, and its industrial implications. *arXiv preprint arXiv*:2007.14138., https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.04.001

19. Hashmi, A. W., Mali, H. S., Meena, A., Ahmad, S., & Tian, Y. (2023). A novel eco-friendly abrasive media based abrasive flow machining of 3D printed PLA parts using IGWO and ANN. *Rapid Prototyping Journal*, 29(10), 2019–2038. https://doi.org/10.1007/s11223-021-00281-3

20. Kechagias, J., & Zaoutsos, S. (2024). Effects of 3D-printing processing parameters on FFF parts' porosity: Outlook and trends. *Materials and Manufacturing Processes*, 39(6), 804–814

21. Hashmi, A. W., Mali, H. S., Meena, A., Ahmad, S., & Tian, Y. (2023). A novel eco-friendly abrasive media based abrasive flow machining of 3D printed PLA parts using IGWO and ANN. *Rapid Prototyping Journal*, 29(10), 2019–2038. https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2023-0136

22. Karimi, N., Bozorgnia Tabary, S. A. A., & Fayazfar, H. (2024). In-depth investigation and industry plan for enhancing surface finishing of 3D printed polymer composite components: A critical review. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(24), e55494.. https://doi.org/10.1002/app.55494

23. Комісаров О. О., Пухальська Г. В., Дядя С. І. Пост-обробка деталей фрезеруванням на верстаті з ЧПК після 3D друку методом наплавлення. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2024. № 1. С. 31–40.

24. Dilberoglu, U. M., Yaman, U., & Dolen, M. (2024). A comprehensive guide to milling techniques for smoothing the surfaces of 3D-printed thermoplastic parts. *Rapid Prototyping Journal*, 30(8), 1648–1662. https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2023-0277

25. Nabavi-Kivi, A., Ayatollahi, M. R., Schmauder, S., & Khosravani, M. R. (2023). Fracture analysis of a 3D-printed ABS specimen: effects of raster angle and layer orientation. *Physical Mesomechanics*, 26(1), 19-32. https://doi.org/10.1134/S1029959923010034

26. Wang, L., Han, J., Tang, Z., Zhang, Y., Wang, D., & Li, X. (2025). Geometric Accuracy Design of High Performance CNC Machine Tools: Modeling, Analysis, and Optimization. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 38(1), 87.https://doi.org/10.1186/s10033-025-01258-y

27. Psarommatis, F., & Azamfirei, V. (2023). Customized quality inspection cycles for achieving sustainable manufacturing in the era of Zero Defect Manufacturing. *Procedia CIRP*, 120, 141–146., https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.08.026

28. Psarommatis, F., & Azamfirei, V. (2024). Zero Defect Manufacturing: A complete guide for advanced and sustainable quality management. *Journal of Manufacturing Systems*, 77, 764–779. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1987551

29. Carta, M., Loi, G., El Mehtedi, M., Buonadonna, P., & Aymerich, F. (2025). Improving Surface Roughness of FDM-Printed Parts Through CNC Machining: A Brief Review. *Journal of Composites Science*, 9(6), 296. https://doi.org/10.3390/jcs9060296

30. Kantaros, A., Ganetsos, T., Petrescu, F. I. T., Ungureanu, L. M., & Munteanu, I. S. (2024). Post-production finishing processes utilized in 3D printing technologies. *Processes*, 12(3), 595.. https://doi.org/10.3390/pr12030595

31. Arunprasand, T. R., & Nallasamy, P. (2024). Advancements in optimizing mechanical performance of 3D printed polymer matrix composites via microstructural refinement and processing enhancements: A comprehensive review. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1–19. https://doi.org/10.1080/15376494.2024.2426776

32. Orel, V. M., Kashuba, S., Yatsina, M. M., & Mazur, V. H. (2024). To the Question of Design and Manufacturing of Special Equipment for Mechanism of Pneumatic Power Receiving Mechanism. *In Applications of Synthetic High Dimensional Data* (pp. 222–237). IGI Global Scientific Publishing.

References

1. Guo, C., Liu, X., & Liu, G. (2021). Surface finishing of fdm-fabricated amorphous polyetheretherketone and its carbon-fiber-reinforced composite by dry milling. *Polymers*, 13(13), 2175. https://doi.org/10.3390/polym13132175

2. Bekas, D. G., Hou, Y., Liu, Y., & Panesar, A. J. C. P. B. E. (2019). 3D printing to enable multifunctionality in polymer-based composites: A review. *Composites Part B: Engineering*, 179, 107540.

3. Chen, T. C. T., & Lin, Y. C. (2019). A three-dimensional-printing-based agile and ubiquitous additive manufacturing system. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 55, 88–95., https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.07.008

4. Mohanavel, V., Ali, K. A., Ranganathan, K., Jeffrey, J. A., Ravikumar, M. M., & Rajkumar, S. J. M. T. P. (2021). The roles and applications of additive manufacturing in the aerospace and automobile sector. *Materials Today: Proceedings*, 47, 405–409. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.596

5. Orel V. M., Kozlovska T. F., Salenko O. F., Melnychuk P. P. (2025) Postoobroblennya virobiv inzhenernogo priznachennya, otrimanikh metodami aditivnogo posharovogo modelingu. [Post-processing of engineering products obtained by additive layer modelling] *Technical Engineering*, vol. 1(95), pp. 76–93. https://doi.org/10.26642/ten-2025-1(95)-76-93

6. Guo, C., Liu, X., & Liu, G. (2021). Surface finishing of fdm-fabricated amorphous polyetheretherketone and its carbon-fiber-reinforced composite by dry milling. *Polymers*, 13, 2175. https://doi.org/10.3390/polym13132175

7. Bruni, C., Gianangeli, C., Mancia, T., Greco, L., & Pieralisi, M. (2020, April). Improving dimensional and surface quality of additive manufactured parts. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1507, No. 4, p. 042003). IOP Publishing. DOI 10.1088/1742-6596/1507/4/042003

8. Salenko, A. F., Derevianko, I. I., Samusenko, A. A., Avramov, K. V., Lithot, A. V., & Rogulin, V. V. (2021). Creation of sealed strong structures of rocket and space equipment FDM printing methods by ULTEM™ 9085 PEI plastic. *Mechanics and Advanced Technologies*. No. 3. 282–293.

9. Salenko, O., Zagirnyak, M., Orel, V., Shlyk, S., & Kulynych, V. (2022, October). FDM products strength increasing using the algorithmic means of 3-D printers working. *In 2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)* (pp. 01–05). IEEE. doi:10.1109/MEES58014.2022.10005667

10. Borthakur, P. P. (2025). The Role and Future Directions of 3D Printing in Custom Prosthetic Design. *Engineering Proceedings*, 81(1), 10. https://doi.org/10.3390/engproc2024081010

11. Górski, F., Wichniarek, R., Kuczko, W., & Żukowska, M. (2021). Study on properties of automatically designed 3d-printed customized prosthetic sockets. *Materials*, 14(18), 5240. https://doi.org/10.3390/ma14185240

12. Darwish, L. R., El-Wakad, M. T., & Farag, M. M. (2021). Towards sustainable industry 4.0: A green real-time IIoT multitask scheduling architecture for distributed 3D printing services. *Journal of Manufacturing Systems*, 61, 196–209., https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.09.004

13. Gómez-Ortega, A., Piedra, S., Mondragón-Rodríguez, G. C., & Camacho, N. (2024). Dependence of the mechanical properties of nylon-carbon fiber composite on the FDM printing parameters. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 186, 108419. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108419

14. Patel, K. S., Shah, D. B., Joshi, S. J., Aldawood, F. K., & Kchaou, M. (2024). Effect of process parameters on the mechanical performance of FDM printed carbon fiber reinforced PETG. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 8006-8018. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.184

15. Fazzini, G., Paolini, P., Paolucci, R., Chiulli, D., Barile, G., Leoni, A.,... & Ferri, G. (2019, June). Print on air: Fdm 3d printing without supports. *In 2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4. 0&IoT)* (pp. 350–354). IEEE. doi: 10.1109/METROI4.2019.8792846

16. Wall, L. W., Schneider, O., & Vogel, D. (2023, October). Substiports: User-Inserted Ad Hoc Objects as Reusable Structural Support for Unmodified FDM 3D Printers. *In Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (pp. 1–20). https://doi.org/10.1145/3586183.3606718

17. Gao, T., Li, C., Yang, M., Zhang, Y., Jia, D., Ding, W.,... & Wang, J. (2021). Mechanics analysis and predictive force models for the single-diamond grain grinding of carbon fiber reinforced polymers using CNT nano-lubricant. *Journal of Materials Processing Technology*, 290, 116976. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116976

18. Aman, B. (2020). Generative design for performance enhancement, weight reduction, and its industrial implications. *arXiv preprint arXiv*:2007.14138., https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.04.001

19. Hashmi, A. W., Mali, H. S., Meena, A., Ahmad, S., & Tian, Y. (2023). A novel eco-friendly abrasive media based abrasive flow machining of 3D printed PLA parts using IGWO and ANN. *Rapid Prototyping Journal*, 29(10), 2019–2038. https://doi.org/10.1007/s11223-021-00281-3

20. Kechagias, J., & Zaoutsos, S. (2024). Effects of 3D-printing processing parameters on FFF parts' porosity: Outlook and trends. *Materials and Manufacturing Processes*, 39(6), 804–814.

21. Hashmi, A. W., Mali, H. S., Meena, A., Ahmad, S., & Tian, Y. (2023). A novel eco-friendly abrasive media based abrasive flow machining of 3D printed PLA parts using IGWO and ANN. *Rapid Prototyping Journal*, 29(10), 2019-2038. https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2023-0136

22. Karimi, N., Bozorgnia Tabary, S. A. A., & Fayazfar, H. (2024). In-depth investigation and industry plan for enhancing surface finishing of 3D printed polymer composite components: A critical review. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(24), e55494.. https://doi.org/10.1002/app.55494

23. Komisarov O. O., Pukhalskaya G. V., Dyadya S. I. (2024) Post-obrobka detalei frezeruvannyam na verstati z ChPK pislya 3D druku metodom naplavlennya. [Post-processing of details by milling on a CNC machine after 3D printing by the solution method] *New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*. vol 1. pp. 31–40.

24. Dilberoglu, U. M., Yaman, U., & Dolen, M. (2024). A comprehensive guide to milling techniques for smoothing the surfaces of 3D-printed thermoplastic parts. *Rapid Prototyping Journal*, 30(8), 1648-1662. https://doi.org/10.1108/RPJ-08-2023-0277

25. Nabavi-Kivi, A., Ayatollahi, M. R., Schmauder, S., & Khosravani, M. R. (2023). Fracture analysis of a 3D-printed ABS specimen: effects of raster angle and layer orientation. *Physical Mesomechanics*, 26(1), 19–32. https://doi.org/10.1134/S1029959923010034

26. Wang, L., Han, J., Tang, Z., Zhang, Y., Wang, D., & Li, X. (2025). Geometric Accuracy Design of High Performance CNC Machine Tools: Modeling, Analysis, and Optimization. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 38(1), 87.https://doi.org/10.1186/s10033-025-01258-y

27. Psarommatis, F., & Azamfirei, V. (2023). Customized quality inspection cycles for achieving sustainable manufacturing in the era of Zero Defect Manufacturing. *Procedia CIRP*, 120, 141–146., https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.08.026

28. Psarommatis, F., & Azamfirei, V. (2024). Zero Defect Manufacturing: A complete guide for advanced and sustainable quality management. *Journal of Manufacturing Systems*, 77, 764–779. https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1987551

29. Carta, M., Loi, G., El Mehtedi, M., Buonadonna, P., & Aymerich, F. (2025). Improving Surface Roughness of FDM-Printed Parts Through CNC Machining: A Brief Review. *Journal of Composites Science*, 9(6), 296. https://doi.org/10.3390/jcs9060296

30. Kantaros, A., Ganetsos, T., Petrescu, F. I. T., Ungureanu, L. M., & Munteanu, I. S. (2024). Post-production finishing processes utilized in 3D printing technologies. *Processes*, 12(3), 595. https://doi.org/10.3390/pr12030595

31. Arunprasand, T. R., & Nallasamy, P. (2024). Advancements in optimizing mechanical performance of 3D printed polymer matrix composites via microstructural refinement and processing enhancements: A comprehensive review. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1–19. https://doi.org/10.1080/15376494.2024.2426776

32. Orel, V. M., Kashuba, S., Yatsina, M. M., & Mazur, V. H. (2024). To the Question of Design and Manufacturing of Special Equipment for Mechanism of Pneumatic Power Receiving Mechanism. *In Applications of Synthetic High Dimensional Data* (pp. 222–237). IGI Global Scientific Publishing.

Дата першого надходження рукопису до видання: 18.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 621.922.3 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.25

С. В. ПОПОВ
кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-2381-152X

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ШЛІФУВАННЯ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ МЕТОДОМ ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Стрічкове шліфування є ефективним методом обробки, а також відновлення інструментів та деталей машин. Воно забезпечує високу якість обробленої поверхні та високу продуктивність. Завдяки гнучкості абразивної стрічки зменшуються термічні пошкодження, зберігається твердість та підвищується довговічність виробів, що зазнали обробки. У роботі зосереджено увагу на вдосконаленні процесу відновлення різального інструменту стригальної машинки методом стрічкового шліфування. Висвітлено слабкі сторони традиційних методів заточування та акцентовано переваги абразивного стрічкового шліфування. Для оптимізації процесу заточування було проведено повний факторний експеримент із трьома змінними: швидкість руху стрічки; час заточування; зусилля притискання. Випробування зазнали як рухомий, так і нерухомий ножі. Шорсткість поверхні вимірювали профілометром, а мікротвердість – твердоміром. Для моделювання впливу технологічних параметрів на шорсткість поверхні були отримані регресійні рівняння, а для перевірки адекватності моделей застосовано статистичні методи (t-критерій Стьюдента, G-критерій Кохрена, F-критерій Фішера). Експериментальні результати засвідчили, що оптимальні параметри заточування становлять: швидкість руху стрічки – 1,7 м/с; зусилля притискання – 18 Н; час заточування – 19 с для нерухомого і 12 с для рухомого ножів. За таких умов забезпечується шорсткість поверхні в межах 9-го класу чистоти (Ra = 0,16…0,32 мкм), зберігається твердість інструменту на рівні HRA 84 та відсутні ознаки термічних пошкоджень. Загалом, дослідження пропонує науково обґрунтовану методику встановлення режимів заточування, що продовжує термін служби інструменту та підвищує ефективність роботи стригальної машинки.

Ключові слова: *стрічкове шліфування, шорсткість поверхні, режимні параметри, мікротвердість, абразивна стрічка, багатофакторний експеримент, коефіцієнти регресії.*

S. V. POPOV
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Mechanical and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0003-2381-152X

DETERMINATION OF THE OPTIMAL GRINDING MODES FOR CUTTING TOOLS USING THE PLANNING METHOD OF EXPERIMENT

Belt grinding is an effective method of machining as well as restoring tools and machine parts. It ensures high surface quality and productivity. Due to the flexibility of the abrasive belt, thermal damage is reduced, hardness is preserved, durability of the processed components is increased. The work focuses on improving the process of restoring cutting tools in shearing machines through belt grinding. The study highlights the shortcomings of traditional sharpening methods and emphasizes the advantages of abrasive belt grinding. To optimize sharpening, a full factorial experiment with three variables was carried out: belt speed, sharpening time, and pressing force. Both movable and stationary knives were tested under controlled conditions, and surface roughness was measured using a profilometer, microhardness was measured using a hardness tester. Regression equations were derived to model the influence of technological parameters on surface roughness, and statistical methods (Student's t-test, Cochran's G-test, Fisher's F-test) were applied to validate the models. Experimental results showed that the optimal sharpening parameters are belt speed of 1.7 m/s, pressing force of 18 N, sharpening time of 19 s for stationary and 12 s for movable knives. These conditions ensure surface roughness within the 9th grade of finish (Ra = 0.16…0.32 μm), preserve tool hardness at HRA 84, and prevent thermal damage. Overall, the research provides a scientifically grounded methodology for setting sharpening regimes that extend tool life and improve shearing machine performance.

Key words: *belt grinding, surface roughness, process parameters, microhardness, abrasive belt, multifactor experiment, regression coefficients.*

© Попов С. В., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Постановка проблеми

Якість роботи стригальних машинок значною мірою залежить від стану їх різальної пари. У процесі експлуатації ножі піддаються інтенсивному зношуванню, що призводить до зниження гостроти кромок, підвищення зусиль різання, перегріву та зменшення терміну служби обладнання. Традиційні методи заточування не завжди забезпечують бажаний рівень точності, чистоти обробки поверхонь, що, у свою чергу, впливає на якість технологічного процесу та комфорт роботи оператора [1–3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Стрічкове шліфування є одним із найбільш перспективних методів відновлення працездатності різальних пар, оскільки дозволяє отримати стабільну якість поверхні за відносно короткий час і з мінімальними витратами. Недостатнє обґрунтування оптимальних режимів призводить до появи дефектів типу припалів, надмірного зношування абразиву та зниження стійкості різальної пари.

Вивченню стрічкового шліфування присвячено чимала кількість наукових робіт, зокрема у роботі [4] відзначається відсутність певної теорії обробки та наявної методики. Саме це обмежує використання стрічкового шліфування як методу обробки робочих поверхонь інструментів. На підставі теоретичних розрахунків та серії експериментів були отримані математичні моделі. Вони встановлюють зв'язок між шорсткістю обробленої поверхні та режимними параметрами обробки. Результати підтверджують можливість підвищення ефективності та якості шліфування за рахунок оптимізації режимів роботи.

Вплив технологічних параметрів стрічкового шліфування на якість поверхні загартованої сталі розглянуто у роботі [5]. Вивчено фактори впливу часу обробки, розміру абразивних зерен, швидкості обертання заготовки та змащування. За результатами роботи встановлено, що найкраще значення шорсткості можливо досягти при часі обробки у 60 с, обертах 900 об/хв та використанні абразивних матеріалів 20 мкм. Застосування змащення позитивно впливає на якість обробленої поверхні, але воно не є домінуючим фактором. Дослідження доводить перспективність стрічкового шліфування як ефективного та економічного способу фінішної обробки сталей.

Методика визначення радіуса вершин абразивних зерен на основі стандартних маркувань шліфувальних кругів (ISO та ГОСТ) запропонована у [6]. Окрім того, розробили формули для розрахунку об'ємної концентрації зерен у колі. Результати моделювання було перевірено експериментально при шліфуванні сталей D3, A295M та SAE 420 абразивними кругами з Al_2O_3 та CBN. Порівняння показало, що відхилення розрахованих значень від експериментальних становить у середньому 15,11 % для круга Al_2O_3 і 24,29 % для CBN, що підтверджує достовірність запропонованої методики. Робота дає вагомий внесок у підвищення точності прогнозування якості поверхні та зменшення часу налагодження шліфувальних процесів.

Підхід машинного навчання застосовано для встановлення залежностей між технологічними параметрами обробки та кінцевою якістю поверхні [7]. Було проведено серію експериментів для збору даних і перевірки точності побудованих моделей. Можливе точне прогнозування шорсткості Ra, мкм. Запропонована методика може бути використана під час визначення оптимальних режимів шліфування. Це матиме позитивний вплив на продуктивність, а також буде зменшено витрати на обробку.

Авторами роботи [8] проведено серію експериментальних досліджень, за результатами яких спрогнозовано значення кінцевої шорсткості поверхонь, оброблених шліфуванням. Проаналізовано вплив швидкості інструменту, глибини різання та подачі на величину шорсткості за результатами обробки. Було запропоновано матмоделі для визначення шорсткості Ra, мкм, на підставі проведеного натурного експерименту. Отримані результати знаходяться у межах допустимого значення похибки, тому запропонований матеріал є доволі актуальний для оптимізації режимів шліфування, а також підвищення ефективності механічної обробки.

Роботизованому процесу стрічкового шліфування присвячено дослідження [9]. Була розроблена топографічна модель поверхні. Вона враховувала деформації еластичного контактного колеса. Результати підтверджені на експериментальному рівні. Запропонована методика надає можливість спрогнозувати значення шорсткості із похибкою, що не перевищує 12 %. Робота має практичне значення у різних галузях промисловості (авіаційна, енергетична, автомобільна). Слід відмітити також забезпечення точності та якості обробки.

Отже, на підставі аналізу літературних джерел [4–9] слід відмітити, що пошук оптимальних режимних параметрів є доволі важливим. Саме вони сприятимуть забезпеченню належного рівня якості та тривалої роботоздатності оброблених поверхонь. На підставі планування повного факторного експерименту можливо забезпечити комплексний підхід впливу режимних параметрів на якість кінцевого продукту за умови наукового обґрунтування обробки стрічковим шліфуванням.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження полягає у визначенні оптимальних режимних параметрів процесу стрічкового шліфування різальної пари стригальної машинки, що забезпечують необхідну шорсткість поверхні, збереження твердості робочих кромок і підвищення довговічності інструменту.

Викладення основного матеріалу дослідження

Під час заточування ріжучих пар стрічковим шліфуванням параметрами, що мають вплив на шорсткість обробленої поверхні, є: зернистість абразивної стрічки; швидкість руху стрічки; зусилля притискання рухомого і нерухомого ножів до стрічки; тривалість контакту деталі зі стрічкою; ступінь зношеності стрічки. Проведення експерименту відбувалося із визначенням швидкості руху стрічки, зусилля притискання ножів до стрічки, часу їх контакту зі стрічкою, які забезпечать шорсткість у межах 9 класу. Для встановлення ступеня впливу керованих режимних параметрів процесу шліфування на якість заточування та визначення їх оптимальних значень, скористаємося методикою проведення багатофакторного експерименту [10].

Залежність параметра шорсткості обробленої поверхні від параметрів (якими можна керувати) процесу шліфування представимо у вигляді рівняння лінійної регресії. Для 3-факторного експерименту воно має вигляд:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (1)$$

де $y = \lg \mathrm{Ra}$ – логарифмічний вираз параметру шорсткості Ra (відгук моделі); x_1, x_2, x_3 – змінні фактори у закодованому вигляді, що відповідають швидкості стрічки V, часу заточування T та зусиллю притискання P_y відповідно; b_0, b_1, b_2, b_3 – коефіцієнти регресії при змінних факторах, що є оцінками їх значущості; b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123} – коефіцієнти регресії, що враховують значущість взаємного впливу змінних факторів безпосередньо на процес шліфування.

Кодування факторів x_1, x_2, x_3 у рівнянні регресії (1) здійснюється за наступними виразами:

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= \frac{2\left(\lg V - \lg V_{\max}\right)}{\lg V_{\max} - \lg V_{\min}} + 1; \\ x_2 &= \frac{2\left(\lg T - \lg T_{\max}\right)}{\lg T_{\max} - \lg T_{\min}} + 1; \\ x_3 &= \frac{2\left(\lg P_y - \lg P_{y\max}\right)}{\lg P_{y\max} - \lg P_{y\min}} + 1. \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

Розрахунок коефіцієнтів регресії b_0, b_1, b_2, b_3 у рівнянні (1) відбувався з урахуванням знаку (±) при змінних факторах:

$$\left.\begin{aligned} b_0 &= \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overline{Y_l}; \\ b_j &= \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}x_{ji}\,\overline{Y_l}, \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

де $\overline{Y_l}$ – середнє значення логарифму шорсткості (три паралельні досліди).

Оцінка вагомості коефіцієнтів регресії здійснюється за допомогою t-критерію Стьюдента. Коефіцієнт регресії bj буде статично значимий при умові:

$$b_j \geq \pm t_{T(p,f_{\bar{y}})} S_{b_j}, \quad (4)$$

де $t_{T(p,f_{\bar{y}})}$ – табличне значення критерію Стьюдента; S_{b_j} – середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів регресії.

При рівні довірчої ймовірності p = 0,95 і числі ступенів вільності дисперсії адекватності $f_{\bar{y}} = N(k-1) = 8(3-1) = 16$ табличне значення критерію Стьюдента становить $t_{T(0,95;\,16)} = 2{,}12$ [10].

Середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів регресії визначається

$$S_{b_j} = \sqrt{\frac{S^2_{\overline{y_l}}}{N}}, \quad (5)$$

де $S^2_{\overline{y_l}}$ – оцінка середнього значення дисперсії відтворюваності:

$$S^2_{\overline{y_l}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}S_i^2, \quad (6)$$

де S_i^2 – дисперсія відтворюваності паралельних дослідів.

Рівні варіювання режимних параметрів стрічкового шліфування подано в таблиці 1.

Виходячи з норм часу заточування рухомого і нерухомого ножів (15...20 і 25...40 с відповідно) приймемо крайні значення часу заточування від 10 до 16 с для рухомого ножа і від 15 до 25 с для нерухомого ножа, з метою скоротити трудомісткість заточування. Прийняті крайні значення швидкості стрічки 1...2 м/с. Рівні варіювання зусилля притискання ножів до поверхні стрічки (виходячи із забезпечення мінімально можливого навантаження на руку слюсаря-заточувальника) – 10...20 Н.

Таблиця 1

Рівні варіювання

Рівень	Швидкість стрічки		Час заточування			Сила притискання	
			T, с		x_2	P_y, Н	x_3
	V, м/с	x_1	ніж рухомий	ніж нерухомий			
Основний	1,5	0	13	20	0	15	0
Верхній	2,0	+1	16	25	+1	20	+1
Нижній	1,0	–1	10	15	–1	10	–1

У ході проведення експериментів нами враховувалася різниця в площі робочих поверхонь ножів. Досліди для рухомого та нерухомого ножів проводилися окремо, але на однакових значеннях параметрів швидкості стрічки і зусилля притискання. Це робилося з метою пошуку значень режимних параметрів, придатних для них двох, що має в майбутньому полегшити експлуатацію верстату.

Згідно із методикою проведення повного факторного експерименту з трьома змінними на двох рівнях, було проведено вісім незалежних дослідів ($N = 2^3$). Кожен з дослідів відповідав граничній точці експерименту.

У таблиці 2 наведена матриця плану проведення експерименту. Рядки відповідають проведеним дослідам, а стовпці X_j – параметрам незалежного і взаємного впливу. Знаку (+) відповідає максимальне значення параметра в експерименті, а знаку (–) мінімальне значення.

Для достовірності по кожному незалежному досліду проводилося не менше 3 паралельних дослідів із визначенням кожен раз параметра шорсткості, обчисленням його середнього арифметичного значення. При побудові рівняння регресії в логарифмічних координатах необхідно представляти отримані експериментально значення шорсткості R_a як логарифм їх значень із символом y_{ik}, а середнє значення логарифмів як $\overline{y_l}$.

Таблиця 2

Матриця плану експерименту $N = 2^3$

№ досліду, N	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+	+
2	+	–	+	+	–	–	+	–
3	+	+	–	+	–	+	–	–
4	+	–	–	+	+	–	–	+
5	+	+	+	–	+	–	–	–
6	+	–	+	–	–	+	–	+
7	+	+	–	–	–	–	+	+
8	+	–	–	–	+	+	+	–

Оцінка відтворюваності паралельних дослідів у логарифмічному виразі здійснювалася за G-критерієм Кохрена. Для прийнятих в експерименті умов дослідів: $p = 0{,}95$; $N = 8$; $f_i = k - 1 = 3 - 1 = 2$. Табличне значення критерію Кохрена за [10] становить: $G_T(0{,}95; 8; 2) = 0{,}516$. Також було визначено розрахункове значення G_p- критерію Кохрена визначається.

Для визначення шорсткості оброблених робочих поверхонь ножів використовувався профілограф-профілометр. Виміри проводилися за поверхнями ріжучих пар до і після їх заточування на стрічковому точильному верстаті.

Для вимірювання відхилень мікротвердості робочих поверхонь ріжучих пар від номінальних значень, характерних для сталі У9, використовувався твердомір. Вимірювання проводилися до і після заточування, за шкалою HRA. Твердість заміряласа біля основи і на кінцях зубців. Основною характеристикою абразивних стрічок є їх зернистість. Цей параметр більшою мірою визначає чистоту обробленої поверхні, оскільки саме від розміру основної фракції зерен у зв'язці стрічки залежить висота мікронерівностей, що залишаються ними на поверхні деталі у процесі шліфування. Встановлено, що найбільша стійкість різальних пар досягається при їх заточуванні із використанням абразиву Р240 (ISO 6344/FEPA) із середнім розміром абразивних частинок 60 мкм.

Під час знаходження оптимальних значень режиму заточування ріжучих пар стрічковим шліфуванням необхідно визначитися зі значенням вихідного показника, що буде відповідати необхідним експлуатаційним характеристикам процесу, що досліджується. Значення шорсткості прийнято 0,2 мкм, що є кращим у ряді значень за 9 класом. Досягнення цього значення буде вважатися необхідним для призначення режиму шліфування, якому відповідають цілі експерименту. Результати виміру шорсткості робочих поверхонь нерухомого ножа, отримані в ході експерименту, представлені у таблиці 3. Досліди проводилися згідно зі складеним планом експерименту. За трьома паралельними дослідами знайдено середнє значення шорсткості $\overline{Ra_l}$.

Спираючись на результати проведеного експерименту, розрахуємо значення коефіцієнтів регресії для наступної підстановки їх у рівняння (1). Розрахунок коефіцієнтів проводився за формулою (2).

Середнє значення дисперсії відтворюваності становить:

$$S^2_{\overline{y_l}} = \frac{1}{8}(33,51 + 26,14 + 11,08 + 8,06 + 15,56 + 6,48 + 9,01 + 22,23)\cdot 10^{-4} = 16,51\cdot 10^{-4}.$$

Середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів регресії:

$$S_{b_j} = \sqrt{\frac{16,51\cdot 10^{-4}}{8}} = 1,1436\cdot 10^{-2}.$$

Таблиця 3

Результати експерименту та їх обробка (нерухомий ніж)

№ досліду	$\overline{Ra_l}$	$\overline{y_l}$	$\widehat{y_l}$	$(\overline{y_l} - \widehat{y_l})^2_i \cdot 10^{-4}$	$S^2_i \cdot 10^{-4}$
1	0,15	–0,8239	–0,8212	0,0729	33,51
2	0,48	–0,3187	–0,319	0,0009	26,14
3	0,35	–0,4559	–0,4534	0,0625	11,08
4	0,62	–0,2076	–0,208	0,0016	8,06
5	0,29	–0,5376	–0,538	0,0016	15,56
6	0,40	–0,3979	–0,3955	0,0576	6,48
7	0,51	–0,2924	–0,2918	0,0036	9,01
8	0,70	–0,1549	–0,155	0,0001	22,23

Статистично значущі коефіцієнти регресії (таблиця 4) повинні задовольняти умові $b_j \geq \pm 2,12 \cdot 1,1436 \cdot 10^{-2} = \pm 0,0304$.

Таблиця 4

Результати розрахунку коефіцієнтів регресії

b_0	b_1	b_2	b_3	b_1b_2	b_1b_3	b_2b_3	$b_1b_2b_3$
0,3987	–0,1287	–0,121	–0,053	0,0325	–0,0595	0,0317	–0,0013

Як ми бачимо, статистично значущими є усі коефіцієнти, окрім $b_1b_2b_3$. Враховуючи оцінку вагомості коефіцієнтів рівняння регресії (1) набуде вигляду:

$$y = 0,3987 - 0,1287x_1 - 0,121x_2 - 0,053x_3 + 0,0325x_1x_2 - 0,0595x_1x_3 + 0,0317x_2x_3. \quad (7)$$

Перевірка адекватності отриманої залежності (7) експериментально отриманим значенням шорсткості поверхні при стрічковому шліфуванні здійснювалася за F-критерієм Фішера. Його розрахункове значення повинно бути більше (дорівнювати) табличного значення при прийнятих умовах експерименту. При узятих в експерименті відомих $p = 0,95$, $f_{\overline{y}} = 16$ і новій умові – числі ступенів вільності дисперсії адекватності, визначається, як $f_{ад} = N - (k + 1) = 8 - (3 + 1) = 4$, табличне значення критерію Фішера склало: $F(0,95; 4; 16) = 3,01$ [10].

Розрахункове значення F-критерію Фішера становить 328,9. Воно більше за табличне значення. Це свідчить про адекватність моделі і слугує підставою для її прийняття у якості робочої саме для опису залежності параметра шорсткості у факторному просторі, що досліджувався.

Підставляючи у вираз (2) для x_1, x_2 та x_3 максимальне і мінімальне значення відповідних їм параметрів V, T, і P_y, отримаємо вирази в декодованому вигляді. Після підстановки їх у (7) і проведення обчислень, маємо вираз рівняння регресії у декодованому вигляді для нерухомого ножа:

$$Ra_c = 1,12 - 0,02 \cdot V - 0,0365 \cdot T - 0,003 \cdot P_y + 0,001 \cdot V \cdot T - 0,015 \cdot V \cdot P_y + 0,0009 \cdot T \cdot P_y. \quad (8)$$

При підстановці в рівняння (8) значень факторів за основним рівнем варіювання $V = 1,5$ м/с, $T = 20$ с і $P_y = 15$ Н маємо розрахункове значення шорсткості поверхні – 0,277 мкм. Експериментальне значення при цих значеннях факторів склало 0,29 мкм, що лежить у межах 5 % похибки експерименту. Аналогічно проведено визначення рівняння регресії для рухомого ножа, а також серія експериментів (таблиця 5).

$$Ra_н = 2,036 - 0,3558 \cdot V - 0,0971 \cdot T - 0,0385 \cdot P_y + 0,015 \cdot V \cdot T - 0,0065 \cdot V \cdot P_y + 0,00258 \cdot T \cdot P_y. \quad (9)$$

За виразами (8) та (9) було визначено оптимальні значення режимів стрічкового шліфування різальної пари на верстаті: швидкість стрічки 1,7 м/с; сила притискання до стрічки 18 Н; час заточування нерухомого ножа 19 с; час заточування рухомого ножа 12 с.

Таблиця 5

Результати експерименту та їх обробка (рухомий ніж)

№ досліду	$\overline{Ra_l}$	$\overline{y_l}$	$\widehat{y_l}$	$(\overline{y_l} - \widehat{y_l})_i^2 \cdot 10^{-4}$	$S_i^2 \cdot 10^{-4}$
1	2	3	4	5	6
1	0,17	–0,7269	–0,7212	0,0623	35,48
2	0,45	–0,2878	–0,2738	0,0009	23,11
3	0,30	–0,4019	–0,4022	0,0625	9,88
4	0,58	–0,2371	–0,2386	0,0016	9,76
5	0,32	–0,4879	–0,4843	0,0016	14,31
6	0,44	–0,3979	–0,3955	0,0576	8,68
7	0,51	–0,2924	–0,2918	0,0036	10,27
8	0,82	–0,1451	–0,1435	0,0001	25,44

Вимірювання мікротвердості робочих поверхонь ножів засвідчило, що за визначених оптимальних режимах обробки вона залишається незмінною. Припали поверхонь, термічне відпускання внаслідок дії високих температур обробки у зоні контакту деталі зі стрічкою відсутні.

Висновки

Запропоновано методику реалізації трифакторного експерименту із визначення функціональної залежності шорсткості оброблених поверхонь ріжучої пари від технологічних параметрів впливу. Встановлено значення параметрів заточування ріжучих пар на верстаті, що відповідають оптимальному режиму роботи (див. вище). Під оптимальним розуміється режим роботи, що забезпечує: значення шорсткості R_a робочих поверхонь ножів у межах 9 класу чистоти обробки (0,16...0,32 мкм); тривалість заточування, що не перевищує нормованого значення 20 с рухомого для ножа і 40 с для нерухомого ножа; збереження твердості робочих поверхонь ріжучої пари на рівні HRA 84, як показника відсутності припалів.

Список використаної літератури

1. Фролов Є. А., Кравченко С. І., Попов С. В., Гнітько С. М. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування: монографія. Полтава: НУПП, 2019. 204 с.

2. Коробко Б. О., Фролов Є. А., Попов С. В., Яcько С. Г. Прогресивні технології у машинобудуванні. Навчальний посібник для студентів механічних спеціальностей закладів вищої освіти. Полтава: НУПП, 2020. 168 с.

3. Попов С.В. Дослідження точності оброблення циліндра різцем із твердого сплаву. Науковий вісник. Запоріжжя: ТДАТУ, 2025. Вип. 15, том 1. С. 105–113. URL: https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-25-1-12 (дата звернення 24.08.2025).

4. Скоркін А. О. Дослідження процесу стрічкового шліфування на еластичній основі. Машинобудування. 2016. № 17. С. 87–93.

5. Hamdi, A., Aliouane, T., Bouzid, D. Technological parameters of belt grinding process of hard steel. Mechanics and Mechanical Engineering. 2017. Vol. 21, No. 4. P. 843–853.

6. Tran Thi V. N., Nguyen Lam K., Nguyen Van C. Research on calculation of grinding surface roughness. EUREKA: Physics and Engineering. 2022. No. 1. P. 85–92. URL: https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.001832 (дата звернення 24.08.2025).

7. Khare S. K., Agarwal S. Predictive modeling of surface roughness in grinding. Procedia CIRP. 2015. Vol. 31. P. 375–380. URL: https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.061 (дата звернення 24.08.2025).

8. Trung D. D., Son N. H. An experimental study on prediction of surface roughness in grinding. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development. 2020. Vol. 10, No. 1. P. 47–58.

9. Liu M., Gong Y., Sun J., Zhao Y., Sun Y. Experimental and numerical study on surface generated mechanism of robotic belt grinding process considering the dynamic deformation of elastic contact wheel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022. Vol. 119, No. 1–2. P. 267–284. URL: https://doi.org/10.1007/s00170-022-09067-6 (дата звернення 24.08.2025).

10. Жученко А. І., Ладієва Л. Р., Піргач М. С., Жураковський Я. Ю. Математичне моделювання процесів і систем: Навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 351 с.

References

1. Frolov, Ye. A., Kravchenko, S. I., Popov, S. V., & Hnitko, S. M. (2019). Technological support of product quality in mechanical engineering. Poltava: NUPP [in Ukrainian].

2. Korobko, B. O., Frolov, Ye. A., Popov, S. V., & Yasko, S. H. (2020). Progressive technologies in mechanical engineering. Poltava: NUPP [in Ukrainian].

3. Popov, S. V. (2025). Study of the accuracy of cylinder machining with a carbide tool. Naukovyi visnyk, 15(1), 105–113 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-25-1-12

4. Skorkin, A. O. (2016). Study of the belt grinding process on an elastic base. Mashynobuduvannia, 17, 87–93 [in Ukrainian].

5. Hamdi, A., Aliouane, T., & Bouzid, D. (2017). Technological parameters of belt grinding process of hard steel. Mechanics and Mechanical Engineering, 21(4), 843–853.

6. Tran Thi, V. N., Nguyen Lam, K., & Nguyen Van, C. (2022). Research on calculation of grinding surface roughness. EUREKA: Physics and Engineering, 1, 85–92. https://doi.org/10.21303/2461-4262.2022.001832

7. Khare, S. K., & Agarwal, S. (2015). Predictive modeling of surface roughness in grinding. Procedia CIRP, 31, 375–380. https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.061

8. Trung, D. D., Son, N. H. (2020). An experimental study on prediction of surface roughness in grinding. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development, 10 (1), 47–58.

9. Liu, M., Gong, Y., Sun, J., Zhao, Y., & Sun, Y. (2022). Experimental and numerical study on surface generated mechanism of robotic belt grinding process considering the dynamic deformation of elastic contact wheel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 119(1–2), 267–284. https://doi.org/10.1007/s00170-022-09067-6

10. Zhuchenko, A. I., Ladiieva, L. R., Pirhach, M. S., & Zhurakovskyi, Ya. Yu. (2021). Mathematical modeling of processes and systems: Textbook. Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 62-83:621.313.333 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.26

Б. І. ПРИЙМАК
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-7680-8565

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ З ПОКРАЩЕНИМИ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

У статті розглянуто проблему підвищення енергетичної ефективності асинхронних електроприводів, які займають провідне місце у промисловості і характеризуються значними сумарними енерговитратами. Проаналізовано сучасні підходи до оптимізації роботи електроприводу, серед яких пошукові екстремальні системи та системи аналітичної оптимізації втрат. Перші відзначаються малою параметричною чутливістю, але мають низьку швидкодію, що обмежує їх застосування в механізмах із часто повторюваними динамічними режимами. Другі забезпечують високу швидкодію та стабільність, проте вони потребують досить точних параметрів моделі втрат потужності.

У роботі запропоновано систему автоматичного керування асинхронним електроприводом із аналітичною оптимізацією втрат, яка враховує омічні втрати у статорі й роторі, а також магнітні втрати в осерді статора. Використано векторне керування з орієнтацією рухомих координат за потокозчепленням ротора, що є поширеним у промислових застосуваннях. На основі математичного аналізу моделі втрат отримано алгоритм оптимізації, що функціонує за сигналами швидкості ротора та q-компонента вектора струму статора. Цей алгоритм достатньо простий для реалізації на сучасних мікроконтролерах у реальному часі. Проведено моделювання системи керування на прикладі асинхронного двигуна загальнопромислового призначення потужністю 0,75 кВт. Досліджено її статичні та динамічні характеристики при зміні навантаження та швидкості двигуна. Отримані результати свідчать, що оптимізація забезпечує істотне зниження втрат у різних режимах роботи. Перехідні процеси мінімізації втрат тривають 0,1–0,2 с, що суттєво менше порівняно із часом знаходження екстремуму у пошукових системах. Таким чином, розроблена система забезпечує енергоефективну роботу асинхронного електроприводу не лише у тривалих усталених режимах, а й у технологічних процесах із короткими інтервалами статичного стану, де застосування пошукових методів стає непрактичним.

Ключові слова: *електропривод, асинхронний двигун, векторне керування, втрати потужності, екстремум, оптимізація енерговитрат.*

B. I. PRYYMAK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation
of Electromechanical Systems and the Electric Drive
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0001-7680-8565

AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF INDUCTION MOTOR DRIVE WITH IMPROVED ENERGY CHARACTERISTICS

In this paper, the problem of improving the energy efficiency of induction motor drives, which play a leading role in industry and are characterized by significant total energy consumption, is considered. Modern approaches to drive optimization are analyzed, including search-based extremum control systems and analytical loss minimization systems. The former are distinguished by low parametric sensitivity but demonstrate low response speed, which limits their application in mechanisms with frequently recurring dynamic modes. The latter provide high speed and stability but require sufficiently accurate parameters of the power loss model.

The paper proposes an automatic control system of an induction motor drive with analytical loss optimization, which accounts for copper losses in the stator and rotor as well as iron losses in the stator core. Vector control with coordinate orientation by the rotor flux linkage, which is widely used in industrial applications, is applied. Based on mathematical analysis of the loss model, an optimization algorithm is derived that operates using rotor speed signals and the q-component of the stator current vector. This algorithm is simple enough for implementation on modern microcontrollers in real time. The control

© Приймак Б. І., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

system was simulated using a 0.75 kW general-purpose induction motor. Its static and dynamic characteristics were investigated under varying load and motor speed. The obtained results show that the proposed optimization ensures a significant reduction of losses in different operating modes. The transient processes of loss minimization last 0.1–0.2 s, which is significantly shorter compared to the extremum search time in search-based systems. Thus, the developed system ensures energy-efficient operation of the induction motor drive not only under long-term steady-state conditions but also in technological processes with short intervals of static state, where the application of search-based methods becomes impractical.

Key words: *electric drive, induction motor, vector control, power losses, extremum, optimization, energy consumption.*

Постановка проблеми

Проблема зниження енергетичних витрат в асинхронних електроприводах (АЕП), які кількісно займають домінуюче місце в промисловості, на сьогодні є важливою. Для підвищення енергетичної ефективності АЕП, поряд із екстремальними пошуковими системами, де відшукується мінімум споживаної приводом активної потужності чи струму статора асинхронного двигуна (АД) [1–3], значного застосування набувають системи аналітичної оптимізації на основі моделей втрат потужності в АЕП [4–7]. Останні мають такі переваги як відсутність потреби в давачеві потужності привода, високу швидкодію, надійність функціонування при різких та значних змінах навантаження і швидкості двигуна. До недоліків цих систем відносять потребу знати параметри моделі, чутливість до варіацій параметрів, а також певні обчислювальні затрати на здійснення оптимізації. Останнім із перелічених недоліків значною мірою можна пояснити те, що в роботах за даною темою часто застосовуються різного типу спрощені моделі втрат потужності. Відповідно якість оптимізації втрат при цьому падає.

Тому актуальною є задача побудови та дослідження системи автоматичного керування (САК) АЕП з аналітичною оптимізацією втрат потужності, яка характеризується поліпшеними якісними показниками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз літературних джерел показує, що в задачах енергетичної оптимізації АЕП знаходять застосування досить різні моделі втрат. Так, в [4] враховуються лише втрати в міді двигуна, у [5] та [6] взяті до уваги втрати як в міді так і в залізі двигуна. Проте в [5] еквівалентний опір R_m у схемі заміщення двигуна, що враховує магнітні втрати, вважається пропорційним частоті живлення АД в степені 1,6, а в [6] опір R_m вважається пропорційним власне частоті живлення двигуна. У цьому контексті стає ясно, що доцільність наведених спрощень моделі втрат не є безсумнівною, оскільки з однієї сторони, внаслідок спрощення моделі знижується точність оптимізації, а з іншої сторони, сучасні промислові мікроконтролери здатні виконувати досить значний обсяг обчислень в реальному часі.

В даній роботі розглядається модель втрат потужності, що включає активні втрати у статорі та роторі, а також магнітні втрати у залізі статора двигуна, причому для втрат у залізі АД використано базову формулу із коефіцієнтами втрат на гістерезис та на вихрові струми. Векторне керування АД здійснюється на основі способу орієнтування рухомих координат за полем ротора двигуна, що на практиці застосовується найчастіше. Отримана функціональна залежність оптимального потокозчеплення від швидкості обертання ротора та *q*-компонента вектора струму статора двигуна. Шляхом математичного моделювання системи керування АЕП досліджено її статичні та динамічні властивості.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є побудова та дослідження системи автоматичного керування швидкістю АЕП, у якій, завдяки аналітичній оптимізації втрат, забезпечується енергетично ефективне функціонування АД в усталених режимах роботи та високі динамічні показники процесів мінімізації втрат у перехідних режимах при змінах навантаження чи швидкості двигуна.

Викладення основного матеріалу дослідження

У зорієнтованій за результуючим вектором потокозчеплення ротора двигуна $\overline{\Psi}_r$ рухомій системі координат *d-q* ідеалізований АД описується наступною системою диференційних рівнянь [8]:

$$\begin{aligned} d\Psi_r/dt &= -\Psi_r/T_r + I_d L_m/T_r \\ dI_d/dt &= -I_d/T_s + U_d/L'_s + \left(\omega_0 L'_s I_q + K_r \Psi_r/T_r\right)/L'_s \\ dI_q/dt &= -I_q/T_s + U_q/L'_s - \left(\omega_0 L'_s I_d + K_r \Psi_r z_p \omega\right)/L'_s \\ d\omega/dt &= \left(M_E - M_H\right)/J, \end{aligned} \tag{1}$$

де Ψ_r, I_d, I_q, ω – відповідно модуль вектора потокозчеплення ротора АД, *d*-компонент та *q*-компонент вектора струму статора, кутова швидкість обертання ротора двигуна; U_d, U_q – *d*- та *q*-компоненти вектора напруги статора; ω_0 – кутова швидкість обертання магнітного поля ротора; $M_E = K_M \Psi_r I_q$ – електромагнітний момент двигуна; M_H – момент навантаження привода; z_p – кількість пар полюсів АД; J – момент інерції привода, зведений до вала двигуна; $T_s = L'_s/R'_s$, $T_r = L_r/R_r$ – відповідно сталі часу статора та ротора АД; $L'_s = L_{ss} + K_r L_{rs}$; $R'_s = R_s + K_r^2 R_r$;

R_s, R_r – активні опори фаз статора та ротора відповідно; $K_r = L_m/L_r$; $K_м = 3z_pK_r/2$; L_{ss}, L_{rs} – індуктивності від полів розсіювання; L_m, L_r – індуктивність намагнічування та повна індуктивність фази ротора відповідно. Кутова швидкість ω_0 вектора $\overline{\Psi}_r$ визначається як

$$\omega_0 = z_p\omega + \omega_s, \tag{2}$$

де $\omega_s = K_rR_rI_q/\Psi_r$ – швидкість ковзання двигуна.

Серед втрат потужності електромагнітної природи в АД виділяються наступні: активні (омічні) втрати у статорі, активні втрати у роторі, магнітні втрати у статорі, магнітні втрати у роторі та додаткові втрати. Традиційно активні втрати також називають втратами у міді, а магнітні втрати – втратами у сталі або в залізі двигуна. Важливо зазначити, що домінуючими серед п'яти названих типів втрат є перші три, які ми і розглядатимемо нижче.

Омічні втрати у статорі та роторі двигуна, нехтуючи впливом на активні опори обмоток поверхневим ефектом та зважаючи на те, що у зорієнтованій за полем ротора АД системі координат модуль вектора струму ротора $I_r = K_rI_q$, визначаються як

$$P_{cu} = 1,5\left[(I_d^2 + I_q^2)R_s + I_q^2K_r^2R_r\right]. \tag{3}$$

Магнітні втрати у залізі (осерді) статора АД обчислюються за виразом

$$P_{fe} = 1,5\Psi_m^2\left(K_h|\omega_0| + K_e\omega_0^2\right), \tag{4}$$

де Ψ_m – модуль вектора потокозчеплення у повітряному проміжку АД; K_h – коефіцієнт втрат від гістерезису; K_e – коефіцієнт втрат від вихрових струмів. Як відомо, у зорієнтованій за $\overline{\Psi}_r$ системі координат $\Psi_m^2 = \Psi_r^2 + I_q^2K_r^2L_{rs}^2$. Проте, оскільки значення L_{rs} є малим, а $K_r < 1$, то для нормальних режимів роботи АД можна прийняти $\Upsilon_m \cong \Psi_r$. У цьому разі із (4) отримаємо

$$P_{fe} \cong 1,5\Psi_r^2\left(K_h|\omega_0| + K_e\omega_0^2\right). \tag{5}$$

Сумарні втрати потужності у двигуні

$$P = P_{cu} + P_{fe}. \tag{6}$$

Для усталених процесів із (1) та (2) матимемо

$$I_d = \Psi_r/L_m, \quad I_q = M_Е/\left(K_м\Psi_r\right), \quad \omega_s = K_rR_rM_Е/\left(K_м\Psi_r^2\right). \tag{7}$$

Підставивши співвідношення (3) та (5) у (6) з урахуванням (7) одержимо вираз для втрат потужності у функції модуля вектора потокозчеплення ротора

$$P = \frac{3}{2}\left(\left(\frac{\Psi_r^2}{L_m^2} + \frac{M_Е^2}{K_м^2\Psi_r^2}\right)R_s + \frac{M_Е^2}{K_м^2\Psi_r^2}K_r^2R_r + \Psi_r^2K_h\left(\left|z_p\omega + \frac{K_rR_rM_Е}{K_м\Psi_r^2}\right|\right) + \Psi_r^2K_e\left(z_p\omega + \frac{K_rR_rM_Е}{K_м\Psi_r^2}\right)^2\right). \tag{8}$$

Тепер, знайшовши похідну та розв'язавши рівняння $dP/d\Psi_r = 0$, дістанемо алгоритм оптимізації втрат у вигляді

$$\Psi_r^{opt} = |I_q|\sqrt{\frac{R_s + K_r^2R_r(1 + K_eR_r)}{R_a/L_m^2 + K_hz_p|\omega| + K_ez_p^2\omega^2}}, \tag{9}$$

де Ψ_r^{opt} – енергетично оптимальне значення модуля вектора потокозчеплення ротора двигуна. Використання в (9) абсолютних значень ω та I_q уможливлює отримання Ψ_r^{opt} при роботі АД як у рушійному режимі, так і в режимі рекуперативного гальмування за обох напрямків обертання ротора. Аналізуючи вираз (9), можна зазначити, що він є достатньо компактний і не складний для обчислення мікроконтролером у реальному часі.

На рис. 1 наведена функціональна схема системи керування швидкістю АЕП з оптимізацією енерговитрат. Система включає такі частини: силову, векторних перетворень, регулювання, енергетичної оптимізації.

Частину векторних перетворень системи складають перетворювачі фаз ПФ1, ПФ2, перетворювачі координат ПК1, ПК2, блок компенсації зв'язків БКЗ та підсистема оцінювання вектора потокозчеплення ротора АД. У ПФ2 вимірювані струми фаз статора I_A, I_B трифазної системи A, B, C перетворюються у сигнали струмів I_α, I_β двофазної системи α–β за виразами

$$I_\alpha = I_A; \quad I_\beta = (I_A + 2I_B)/\sqrt{3}. \tag{10}$$

За допомогою ПК2 I_α, I_β перетворюються у сигнали струмів I_d, I_q рухомої системи координат d–q згідно з рівняннями

$$I_d = I_\alpha\cos\Theta_0 + I_\beta\sin\Theta_0; \quad I_q = I_\beta\cos\Theta_0 - I_\alpha\sin\Theta_0, \tag{11}$$

де Θ_0 є кутовим положенням вектора $\overline{\Psi}_r$. У БКЗ визначаються сигнали $u_{dк}$, $u_{qк}$ компенсування внутрішніх перехресних зв'язків моделі АД згідно із отриманими з 2-го та 3-го рівнянь системи (1) виразами

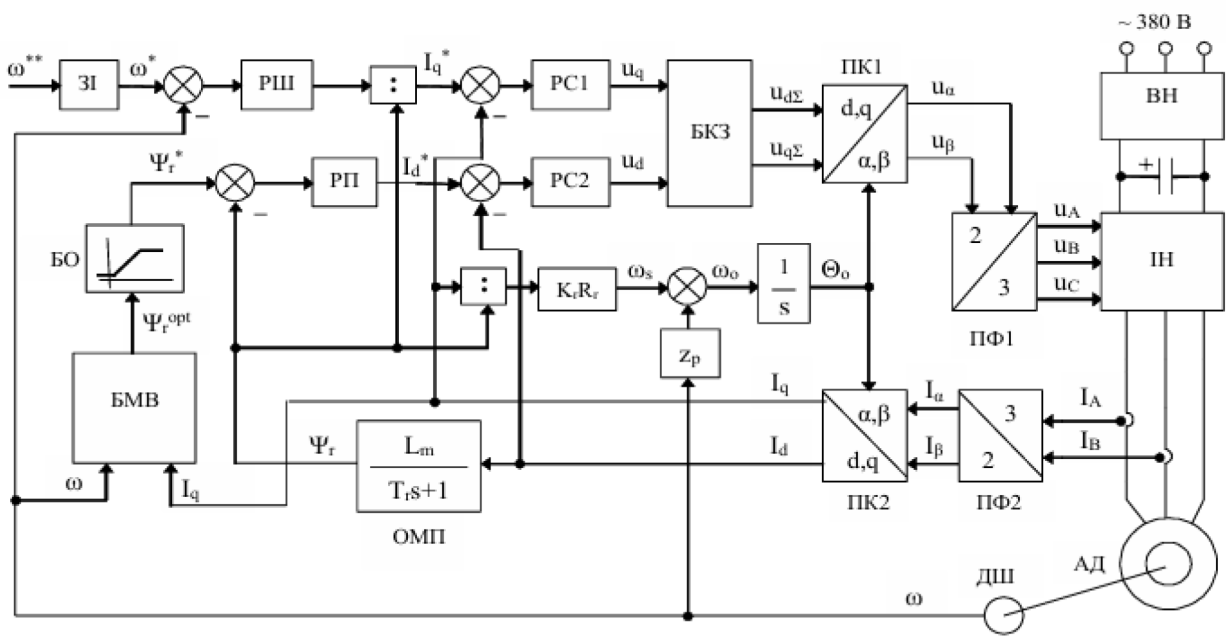


Рис. 1. Функціональна схема САК АЕП із оптимізацію енерговитрат

$$u_{dk} = -(L'_s\omega_0 I_q + K_r\Psi_r/T_r)/K_I; \quad u_{qk} = (L'_s\omega_0 I_d + K_r z_p\omega\Psi_r)/K_I, \tag{12}$$

де K_I – коефіцієнт передачі ІН, що розглядається як статична пропорційна ланка. Після обчислення u_{dk}, u_{qk} у БКЗ формуються завдання $u_{d\Sigma}$, $u_{q\Sigma}$ компонентів вектора напруги статора двигуна U_d, U_q як

$$u_{d\Sigma} = u_d + u_{dk}; \quad u_{q\Sigma} = u_q + u_{qk}. \tag{13}$$

Перетворення сигналів із системи координат d-q у систему координат α-β здійснюється в ПК1 згідно з виразами

$$u_\alpha = u_{d\Sigma}\cos\Theta_0 - u_{q\Sigma}\sin\Theta_0; \quad u_\beta = u_{d\Sigma}\sin\Theta_0 + u_{q\Sigma}\cos\Theta_0. \tag{14}$$

Сигнали u_α, u_β двофазної системи у ПФ1 перетворюються у сигнали завдання напруг статора двигуна u_A, u_B, u_C трифазної системи A, B, C як

$$u_A = u_\alpha; \quad u_B = (-u_\alpha + \sqrt{3}u_\beta)/2; \quad u_C = (-u_\alpha - \sqrt{3}u_\beta)/2. \tag{15}$$

У підсистемі оцінювання вектора потокозчеплення ротора АД визначається модуль Ψ_r та кут Θ_0 вектора $\bar{\Psi}_r$ згідно із отриманими з 1-го рівняння системи (1) та з (2) виразами

$$\Psi_r(s) = I_d(s)\cdot\frac{L_m}{T_r s+1}; \quad \Theta_0(t) = \int_0^t \omega_0(\tau)d\tau, \tag{16}$$

де s – оператор перетворення Лапласа. Ця підсистема включає оцінювач модуля потокозчеплення ОМП, де визначається Ψ_r, та сукупність ланок для обчислення Θ_0.

Частину регулювання зображеної на рис. 1 системи складають чотири ПІ-регулятори – два регулятори компонентів вектора струму статора двигуна РС1, РС2, регулятор швидкості РШ та регулятор потокозчеплення РП, а також давач швидкості ДШ та задавач інтенсивності зміни швидкості ЗІ. Останній забезпечує трансформацію прямокутної форми командного сигналу ω^{**} у трапецевидну форму сигналу ω^* завдання швидкості АД.

Частину енергетичної оптимізації системи керування АЕП складають блок мінімізації втрат БМВ та блок обмеження БО. Завданням БМВ є отримання Ψ_r^{opt} згідно з (9). БО здійснює обмеження вхідного сигналу зверху на рівні номінального значення потокозчеплення, а також знизу на певному рівні, щоб унеможливити повне розмагнічування магнітопроводу двигуна. З виходу БО сигнал Ψ_r^* завдання потокозчеплення поступає на вхід РП. За необхідності зробити процеси оптимізації втрат потужності більш плавними, між БМВ та БО може бути введено фільтр у вигляді аперіодичної ланки 1-го порядку.

Необхідно зазначити, що успішне функціонування даної системи можливе за умови здійснення адаптації параметрів оцінювача $\bar{\Psi}_r$ до реальних значень опору ротора АД, який зазнає значних варіацій при змінах теплового стану двигуна. Проте, оскільки розгляд алгоритмів адаптування до змін R_r виходив за межі даної статті, підсистема адаптації на рис. 1 не відображена. Приклади реалізації такої підсистеми наявні у [5], [8].

Для моделювання системи керування АЕП було використано АД загальнопромислового призначення з наступними характеристиками.

Паспортні дані двигуна: потужність – 750 Вт; частота живлення – 50 Гц; фазна напруга статора – 220 В; струм фази статора – 2,16 А; швидкість обертання ротора – 1387 об/хв.

Параметри моделі АД: $R_s = 10{,}6$ Ом; $R_r = 9{,}57$ Ом; $L_s = 0{,}513$ Гн; $L_r = 0{,}551$ Гн; $L_m = 0{,}486$ Гн; $z_p = 2$; $J = 0{,}0028$ кг · м^2; $K_h = 7{,}95 \cdot 10^{-2}$ А/Вб; $K_e = 2{,}7 \cdot 10^{-4}$ А · с/Вб. Періоди дискретизації в цифрових регуляторах РС1 та РС2 дорівнюють 0,25 мс, в РШ та РП – 1 мс, а період обчислення Ψ_r^{opt} у БМВ встановлено рівним 5 мс. Параметри ЗІ вибрані такими, щоб час зміни ω* від нуля до номінального значення дорівнював 0,25 с.

З метою дослідження статичних та динамічних властивостей системи були здійснені числові експерименти з її моделлю при змінах швидкості та навантаження АЕП, результати яких подані на рис. 2, 3. На цих рисунках для порівняння показані процеси у системі без оптимізації втрат, де $\Psi_r^* = \text{const}$ (криві проведені тонкою лінією), та з оптимізацією, де $\Psi_r^* = \text{var}$ (криві проведені потовщеною лінією).

На рис. 2 відображені процеси у системі при змінах швидкості від 0,6 до 0,8 в.о. (відносних одиниць) та навпаки, від 0,8 до 0,6 в.о. за момента навантаження двигуна, рівного 30 % від номінального.

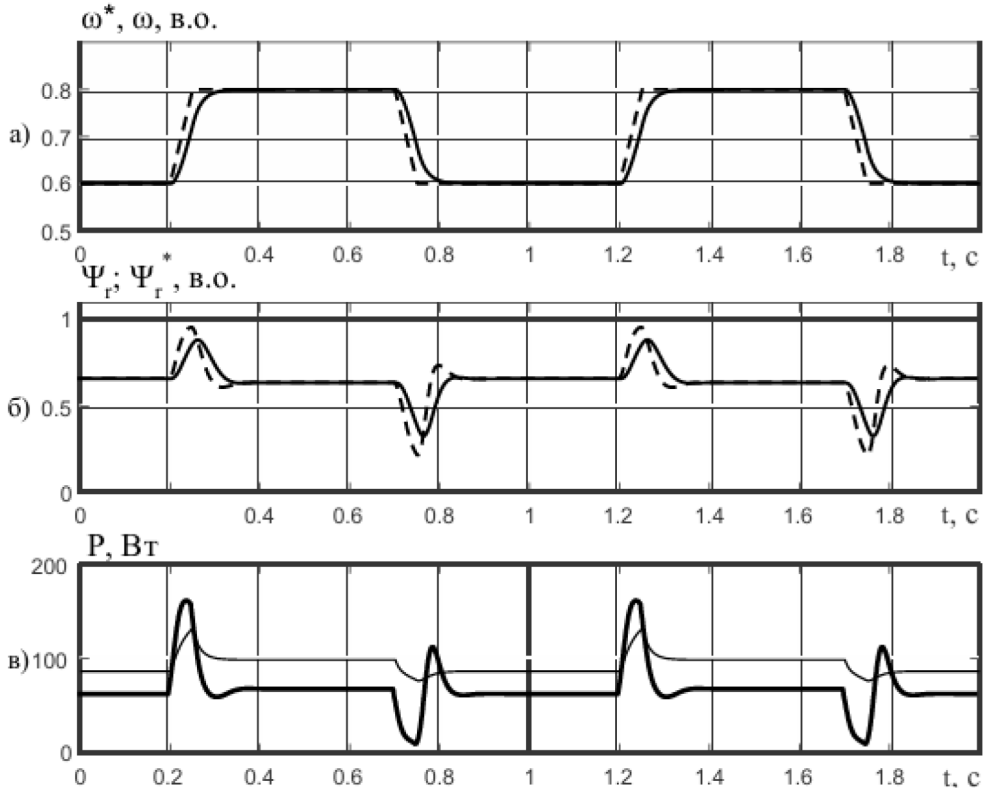


Рис. 2. Процеси керування та оптимізації втрат потужності в САК АЕП при змінах швидкості двигуна

Завдання швидкості ω* (пунктирна лінія) та дійсна швидкість ω (суцільна лінія) наведені на рис. 2, *а*. На рис. 2, *б* відображено суцільною лінією сигнал модуля вектора потокозчеплення ротора Ψ_r, а штриховою лінією сигнал його завдання Ψ_r^*. Графіки втрат потужності в АД показані на рис. 2,в. Згідно з останнім рисунком, завдяки оптимізації в усталених процесах втрати потужності в АЕП зменшуються на 23,5 Вт при ω = 0,6 в.о. і на 30,7 Вт при ω = 0,8 в.о.

На рис. 3 зображені процеси у системі при змінах момента навантаження двигуна за номінальної швидкості. Момент навантаження $M_н$, що змінюється стрибкоподібно від 0,1 в.о. до 0,5 в.о. та навпаки, показано на рис. 3, *а*. На рис. 3, *б* наведено сигнали Ψ_r (суцільна лінія) та Ψ_r^* (пунктирна лінія). Графіки втрат потужності в АД показані на рис. 3,в. Згідно з цими графіками, внаслідок оптимізації в усталених процесах втрати потужності в приводі при $M_н$ = 0,5 в.о. зменшуються на 16,3 Вт, а при $M_н$ = 0,1 в.о. – на 78 Вт.

У цілому наведені на рис. 2, 3 результати числових експериментів засвідчують, що енергоефективна система керування АЕП є стійкою та має високу швидкодію. Перехідні процеси мінімізації втрат потужності в АД протікають плавно та без коливань, їхня тривалість становить 0,1–0,2 с. Поряд з цим, згідно із наведеними у [2, 3] результатами експериментальних досліджень, у пошукових системах процеси мінімізації активної потужності

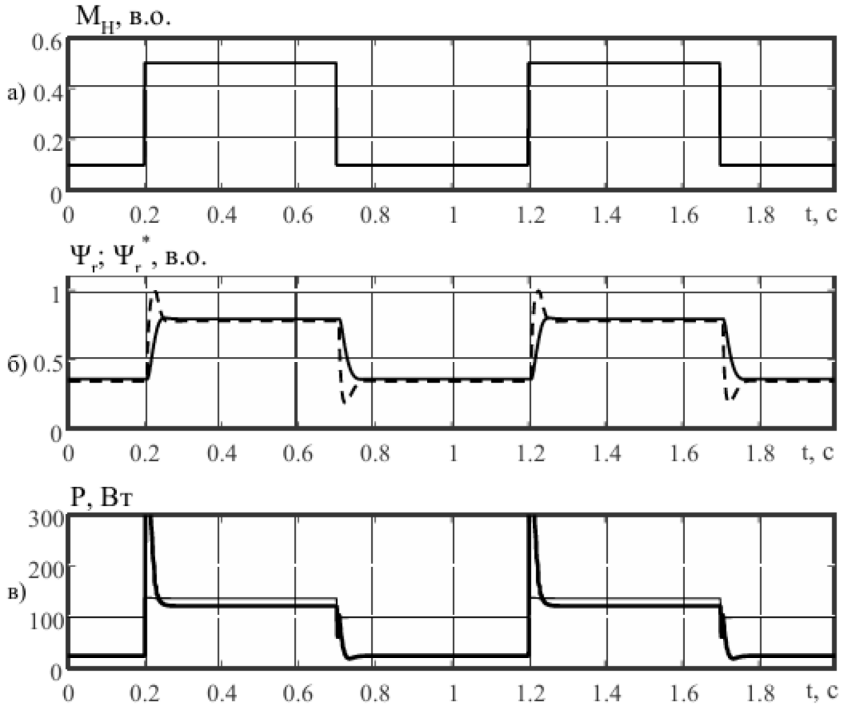


Рис. 3. Процеси керування та оптимізації втрат потужності в САК АЕП при змінах навантаження двигуна

привода тривають 5–10 с. Звідси випливає, що, у порівнянні із системами пошукової оптимізації, область застосування запропонованої САК АЕП є ширшою, оскільки вона придатна для технологічних процесів із усталеними режимами не тільки великої, а й малої тривалості.

Висновки

1. Отриманий алгоритм (9) оптимізації енерговитрат в асинхронному електроприводі враховує омічні втрати у статорі й роторі, а також магнітні втрати в осерді статора АД і є достатньо простим для реалізації на мікроконтролері у реальному часі.

2. Результати математичного моделювання САК АЕП підтверджують, що вона забезпечує енергетично ефективне функціонування двигуна в усталених режимах роботи та високі динамічні показники процесів мінімізації втрат потужності у перехідних режимах АД.

3. Завдяки малому часу перехідних процесів оптимізації втрат, який становить 0,1–0,2 с, запропонована енергоефективна САК АЕП може застосовуватись для технологічних процесів не лише із довгочасними, але й з короткочасними усталеними режимами тривалістю порядку декількох секунд.

Список використаної літератури

1. Лисенков М. Г., Козлик Г. О., Гагарін П. П. Пошукові системи енергозберігаючого керування асинхронним електроприводом. *Автоматизація виробничих процесів*, № 2, 2000. С. 36–41.

2. Kaboli S., Zolghadri M., Khajeh E., Homaifar A. A fast flux search controller for DTC-based induction motor drives. *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 54, no. 5, 2007, pp. 2407–2415. DOI: 10.1109/TIE.2007.900341

3. Karlovsky P., Lett J. and Bauer J. Optimum Flux Search Control on Induction Motor Drive with Predictive Torque Control. *21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, Prague, Czech Republic, 2020, pp. 1–5, DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269212

4. Chang J.H., Kim B.K. Minimum-Time Minimum-Loss Speed Control of IM Under Field-Oriented Control. *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 44, no. 6, 1997, pp. 809–815. DOI: 10.1109/41.649942

5. Matsuse K., Yoshizumi T., Katsuta S. and Taniguchi S. High-Response Flux Control of Direct-Field-Oriented Induction Motor with High Efficiency Taking Core Loss into Account. *IEEE Transactions on industrial Applications*, vol. 35, no.1, 1999, pp.62-69. DOI: 10.1109/28.740846

6. Rasmussen K. S., Thogersen P. Model Based Energy Optimazer for Vector Controlled IMD. *Procced. of EPE'97*, Trondheim, 1997, pp. 3.711–3.716.

7. Приймак Б.І. Векторне керування асинхронним електроприводом з нейромережною оптимізацією енерговитрат. *Праці Ін-ту електродинаміки НАН України*, № 3 (21), 2008. С. 61–71.

8. Novotny D. W., Lipo T. A. Vector control and dynamics of AC drives. Oxford : Clarendon press, 2005, 440 p.

References

1. Lysenkov, M. G., Kozlyk, G. O., Gagarin, P. P. (2000) Search systems for energy-saving control of an asynchronous electric drive [Poshukovi systemy enerhozberihaiuchoho keruvannia asynkhronnym elektropryvodom]. *Automation of production processes*, 2, pp. 36–41. [in Ukrainian]

2. Kaboli, S., Zolghadri, M., Khajeh, E., Homaifar, A. (2007) A fast flux search controller for DTC-based induction motor drives. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 54(5), pp. 2407–2415. DOI: 10.1109/TIE.2007.900341

3. Karlovsky, P., Lett, J. Bauer, J. (2020) Optimum Flux Search Control on Induction Motor Drive with Predictive Torque Control. *21st International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*, Prague, Czech Republic, pp. 1–5, DOI: 10.1109/EPE51172.2020.9269212

4. Chang, J. H., Kim, B. K. (1997) Minimum-Time Minimum-Loss Speed Control of IM Under Field-Oriented Control. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 44(6), pp. 809–815. DOI: 10.1109/41.649942

5. Matsuse, K., Yoshizumi, T., Katsuta, S., Taniguchi, S. (1999) High-Response Flux Control of Direct-Field-Oriented Induction Motor with High Efficiency Taking Core Loss into Account. *IEEE Transactions on industrial Applications*, 35(1), pp. 62–69. DOI: 10.1109/28.740846

6. Rasmussen, K. S., Thogersen, P. (1997) Model Based Energy Optimazer for Vector Controlled IMD. *Procced. of EPE'97*, Trondheim, pp. 3.711–3.716.

7. Pryymak, B. (2008) Vector control of an induction motor drive with neural network optimization of energy costs [Vektorne keruvannia asynkhronnym elektropryvodom z neiromerezhnoiu optymizatsiieiu enerhovytrat]. *Pratsi In-tu elektrodynamiky NAN Ukrainy*, 21, pp. 61-71. [in Ukrainian].

8. Novotny, D. W., Lipo, T. A. (2005) Vector control and dynamics of AC drives. Oxford: Clarendon press, 440 p.

Дата першого надходження рукопису до видання: 20.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 14.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 531.3+519.6+621.8 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.27

І. В. РАДЯК
аспірант кафедри лісопромислового виробництва та лісових доріг
Національний лісотехнічний університет України
ORCID: 0009-0005-4516-9146

Б. Я. БАКАЙ
кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри лісопромислового виробництва та лісових доріг
Національний лісотехнічний університет України
ORCID: 0000-0002-8707-9895

АНАЛІЗ ПОПЕРЕЧНИХ КОЛИВАНЬ СТРІЛИ МАНІПУЛЯТОРА З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ РЕЛЕЯ

У статті розглянуто задачу визначення основної власної частоти поперечних коливань стріли маніпулятора, змодельованої як пружна балка Ейлера-Бернуллі, встановлена на двох шарнірних опорах. Метою дослідження є підвищення точності та інженерної надійності оцінювання динамічних характеристик подібних конструкцій шляхом застосування енергетичного методу Релея. Для розв'язання задачі сформовано низку апроксимаційних пробних функцій, що задовольняють граничні умови нульових прогинів на кінцях і відображають реальну форму коливань. Розглянуто вісім варіантів пробних функцій різної складності – від класичної синусоїдальної до поліноміальних, експоненційних та комбінованих форм із варіаційним підбором параметрів. Проведено обчислення інтегральних співвідношень для енергії згину та кінетичної енергії, що дозволило визначити частоти власних коливань і порівняти їх з аналітично точним розв'язком.

Результати аналізу показали, що використання синусоїдальної пробної функції забезпечує практично точне значення основної власної частоти, а наближення за статичною формою прогину та потенціальною функцією дає похибку менш ніж один відсоток. Параболічні та лінійні апроксимації демонструють прийнятну, хоча й помітно більшу, похибку близько 11 %. Водночас кубічна та експоненційна форми виявилися недостатньо адекватними, що підтверджується суттєвим перевищенням розрахованої частоти порівняно з точним розв'язком. Порівняльна оцінка різних пробних функцій дозволила обґрунтувати вибір найефективніших варіантів для інженерних розрахунків та підкреслити важливість попереднього аналізу кривини пробної форми, від якої залежить точність енергетичного методу.

Отримані результати мають практичну цінність для проєктування та оптимізації підіймально-транспортних машин, роботизованих маніпуляторів і кранових систем, де необхідно враховувати вплив динамічних навантажень та уникати резонансних режимів. Використання методу Релея з адекватно підібраною пробною функцією забезпечує швидке й надійне оцінювання власних частот без залучення складних чисельних моделей, що є важливим у початкових етапах проєктування та верифікації конструкцій.

Ключові слова: *власні коливання, метод Релея, стріла маніпулятора, пробні функції, динамічний аналіз, інженерне проєктування.*

I. V. RADIAK
Postgraduate Student at the Department of Forest Engineering
Ukrainian National Forestry University
ORCID: 0009-0005-4516-9146

B. YA. BAKAY
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Forest Engineering
Ukrainian National Forestry University
ORCID: 0000-0002-8707-9895

RAYLEIGH-BASED ANALYSIS OF TRANSVERSE VIBRATIONS IN A MANIPULATOR BOOM

The article addresses the problem of determining the fundamental natural frequency of transverse vibrations of a manipulator boom modelled as an elastic Euler–Bernoulli beam supported on two hinged bearings. The aim of the study is to enhance the accuracy and engineering reliability of evaluating the dynamic characteristics of such

© Радяк І. В., Бакай Б. Я., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

structures by applying the Rayleigh energy method. To solve this problem, a set of approximate trial functions was formulated to satisfy the boundary conditions of zero deflection at the ends and to reflect the actual mode shape of the vibrations. Eight variants of trial functions of varying complexity are examined, ranging from the classical sinusoidal form to polynomial, exponential and combined expressions with variational parameter selection. Integral relations for the bending and kinetic energies were evaluated, enabling the determination of the natural frequencies of vibration and their comparison with the analytically exact solution.

The analysis revealed that employing a sinusoidal trial function provides an almost exact value of the fundamental natural frequency, while approximations based on the static deflection shape and the potential function produce an error of less than one per cent. Parabolic and linear approximations exhibit an acceptable, though noticeably larger, error of about eleven per cent. In contrast, cubic and exponential forms proved to be insufficiently adequate, which is confirmed by a significant overestimation of the calculated frequency relative to the exact solution. A comparative assessment of the different trial functions justified the choice of the most effective options for engineering calculations and emphasised the importance of a preliminary analysis of the trial function curvature, on which the accuracy of the energy method depends.

The findings have practical value for the design and optimisation of lifting and transport machinery, robotic manipulators and crane systems, where the influence of dynamic loads must be considered and resonant operating conditions avoided. The use of the Rayleigh method with an appropriately selected trial function ensures a rapid and reliable evaluation of natural frequencies without recourse to complex numerical models, which is particularly important at the early stages of design and structural verification.

Key words: *natural vibrations, Rayleigh method, manipulator boom, trial functions, dynamic analysis, engineering design.*

Постановка проблеми

Сучасні гідравлічні маніпулятори (рис. 1), що застосовуються в лісовому господарстві та інших суміжних галузях, працюють у складних умовах [1, 2], які характеризуються значними динамічним навантаженням та інтенсивністю роботи [3], де від точності прогнозування власних частот та форм коливань залежить надійність і довговічність конструкцій. Стріла маніпулятора, яка за своєю природою є гнучкою балковою системою, під час роботи зазнає змінних навантажень та динамічних впливів від гідроприводу і транспортованого вантажу. Недооцінювання власних частот може призвести до резонансних режимів, перевищення допустимих напружень і пришвидшеного зносу, що обумовлює необхідність поглибленого теоретичного аналізу її коливань. Одним із ефективних інструментів для оцінки власних частот таких конструкцій є метод Релея, який ґрунтується на рівності максимальної потенціальної та кінетичної енергій системи.

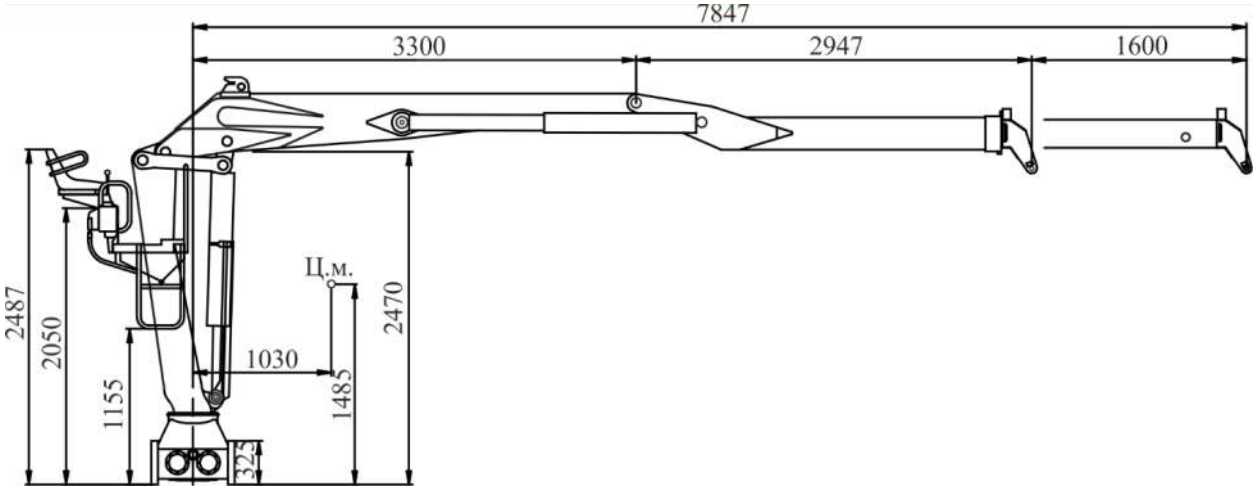


Рис. 1. Гідравлічний маніпулятор LIV L18.78P для навантажувально-розвантажувальних робіт

Класичні підходи до динамічного розрахунку балок, зокрема точні розв’язки рівняння Ейлера-Бернуллі або чисельні методи, забезпечують високу точність, однак потребують значних обчислювальних ресурсів або складних аналітичних перетворень. Тому для швидкої інженерної оцінки першої власної частоти та форми коливань залишається актуальним використання варіаційних методів. Серед них метод Релея займає провідне місце завдяки поєднанню аналітичної прозорості та практичної ефективності. У науковій літературі метод Релея широко використовуються для розрахунків балкових, рамних та оболонкових конструкцій, що підтверджують фундаментальні праці у галузі інженерної механіки та варіаційних принципів. Проте для специфічних задач моделювання коливань стріл маніпуляторів, особливо з урахуванням різних апроксимаційних форм коливань, комплексних порівняльних досліджень усе ще недостатньо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз динамічної поведінки деформівних систем, таких як стріли маніпуляторів, є фундаментальною задачею у сучасному машинобудуванні [1, 2]. Визначальним чинником такого аналізу є визначення спектра власних частот коливань, оскільки ця інформація є вирішальною для запобігання резонансним явищам, проєктування систем керування та забезпечення довговічності конструкції [4]. Класичний підхід до розв'язання цієї задачі полягає у формулюванні та розв'язанні відповідного диференціального рівняння руху в частинних похідних, що для балки Ейлера-Бернуллі є рівнянням четвертого порядку [5]. Однак, отримання точних аналітичних розв'язків можливе лише для обмеженого категорії задач з простими геометріями та ідеалізованими граничними умовами.

З огляду на зазначені труднощі, широкого розповсюдження набули варіаційні принципи та методи інженерної механіки. Як показано у працях з варіаційного числення [6], задача про коливання може бути переформульована з диференціальної постановки в інтегральну. Замість безпосереднього розв'язання рівняння руху, визначається стаціонарне значення певного функціоналу, зазвичай енергетичного. Для консервативних коливних систем таким є функціонал повної енергії, а відповідний варіаційний принцип – принцип Гамільтона [7, 8]. Зазначений підхід характеризується ширшою універсальністю та високим аналітичним потенціалом, оскільки дозволяє працювати зі скалярними енергетичними величинами, що значно спрощує математичні викладки, особливо для систем зі складною геометрією.

Коли точне знаходження екстремуму функціоналу є неможливим, застосовують прямі методи варіаційного числення, такі як методи Рітца, Бубнова-Гальоркіна та Треффца та інші [9–11]. Суть цих методів полягає у апроксимації невідомого розв'язку (форми коливань) у вигляді скінченної лінійної комбінації заздалегідь обраних базисних функцій. Це дозволяє звести задачу для континуальної системи зі нескінченною кількістю ступенів свободи до аналізу алгебраїчної системи зі скінченним числом невідомих.

Метод Релея є одним із перших і найпростішим з прямих варіаційних методів, спеціально розроблених для наближеного визначення фундаментальної (найнижчої) власної частоти [12]. Його ефективність та простота зробили його незамінним інструментом для швидких інженерних оцінок [13]. Методологічна основа цього підходу полягає у тому, що точність отриманого результату критично залежить від того, наскільки вдало обрана апроксимаційна функція (пробна форма коливань) відтворює реальну першу моду коливань системи [14]. Хоча метод Релея є класичним, дослідження щодо вибору та порівняння ефективності різних класів пробних функцій для специфічних інженерних об'єктів, таких як стріли маніпуляторів, залишаються актуальними, оскільки дозволяють виробити практичні рекомендації для досягнення оптимального балансу між точністю та складністю розрахунків.

Формулювання мети дослідження

Метою цієї роботи є розроблення та обгрунтування методики застосування методу Релея для оцінки динамічних характеристик стріли маніпулятора, зокрема її першої (основної) власної частоти та форми коливань. Моделювання проводиться для балки на двох шарнірних опорах. Дослідження зосереджене на визначенні впливу вибору пробних функцій на точність розрахунків та на порівняльному аналізі отриманих результатів з метою виявлення найефективніших апроксимацій.

Викладення основного матеріалу дослідження

Будь-яка конструкція, наприклад балка на шарнірних опорах (Рис. 2, *а*), може теоретично набувати різних форм деформації (Рис. 2, *б*). Однак для заданого навантаження реалізується лише один конкретний стан, що забезпечує рівновагу (Рис. 2, *в*). Згідно з принципом мінімуму потенційної енергії, цей унікальний стан деформації відповідає точці екстремуму потенційної енергії. Отже, задача знаходження деформації рівноваги еквівалентна задачі варіаційного числення на знаходження екстремуму. Стабільність рівноваги визначається типом екстремуму: стан є стійким, якщо потенційна енергія мінімальна.

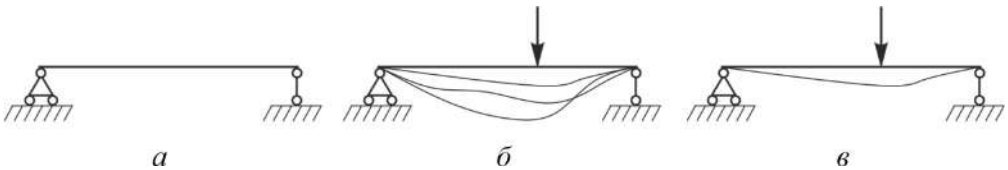


Рис. 2. Балка на двох опорах навантажена зосередженою силою

Стріла маніпулятора розглядається як пряма однорідна балка Ейлера-Бернуллі, довжиною L з постійною згинальною жорсткістю EI та рівномірною лінійною масою $\overline{m}$, встановленою на двох шарнірних опорах. На середину прольоту діє зосереджена поперечна сила P, яка визначає статичну форму прогину, але у власних коливаннях враховується лише як попереднє деформування. Для моделювання стріли прийняті такі основні припущення:

1. Стріла моделюється як класична балка Ейлера-Бернуллі довжиною L з постійними матеріальними та геометричними параметрами E (модуль пружності) і I (момент інерції поперечного перерізу);
2. Малі поперечні переміщення: $|w(x, t)| \ll L$, геометрична нелінійність не враховується;

3. Поперечне переміщення (прогин) $w(x, t)$ описується одним просторовим полем, як функція координати x і часу t; деформації перетину по товщині нехтуються; поперечні зсуви та інерції обертання перерізу не враховуються;

4. Відсутність прогину та згинального моменту на опорах: $w(0, t) = w(L, t) = 0$, $M(0, t) = M(L, t) = 0 \Rightarrow w''(0, t) = w''(L, t) = 0$;

5. Наявна зосереджена поперечна сила P у точці $x = L/2$. Ця сила задає статичне прогинання стріли.

З використанням припущень рівняння поперечних коливань балки жорсткістю EI з поперечним навантаженням по довжині $q(x, t) = P\delta(x - L/2)$ від зосередженої сили P має вигляд

$$EI\frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + \bar{m}\frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} = q(x,t), \tag{1}$$

Рівняння (1) в окремому випадку вільних гармонічних коливань $w(x, t) = \psi(x)e^{iwt}$ дає можливість записати однорідне рівняння четвертого порядку, що описує власні коливання пружної балки згідно з теорією Ейлера-Бернуллі

$$EI\psi^{(4)}(x) - \bar{m}\omega^2\psi(x) = 0, \tag{2}$$

де $\psi^{(4)}(x)$ – четверта похідна функції $\psi(x)$ за координатою x; ω – кутова частота коливань; $\psi(x)$ – безрозмірна просторова форма коливань.

Розв'язок рівняння (2) за відповідних граничних умов дає власні функції та власні значення частоти. Використання статичної форми $w_s(x)$ як пробної форми $\psi(x)$ у методі Релея покращує апроксимацію першої моди, хоча прямого «збільшення/зменшення» жорсткості через поперечне значення P без осьових ефектів не відбувається.

Припустимо, що поперечні коливання w на основі обраної безрозмірної функції коливань $\psi(x)$ з амплітудою A та циклічною частотою ω мають гармонічний характер і описуються функцією

$$w(x, t) = A\psi(x)\sin(\omega t). \tag{3}$$

Фізичний зміст рівняння (3) відображає прогин балки як добуток амплітуди A, просторової форми $\psi(x)$ і часової частини $\sin(\omega t)$. Потенціальну енергію згину балки у момент часу t визначимо за формулою

$$V(t) = \frac{1}{2}\int_0^L EI\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)^2 dx = \frac{1}{2}A^2\sin^2(wt)\int_0^L EI\left[\psi''(x)\right]^2 dx. \tag{4}$$

Рівняння (4) відображає енергію, що акумулюється у балці при її згинанні, через інтеграл квадрата кривизни прогину, помноженої на жорсткість балки. Максимум енергії відповідає максимальній деформації при максимальній амплітуді коливань. Тоді максимальна потенціальна енергія згину та максимальна кінетична енергія коливань рівні

$$V_{\max} = \frac{1}{2}A^2\int_0^L EI\left[\psi''(x)\right]^2 dx, \tag{5}$$

$$T_{\max} = \frac{1}{2}A^2\omega^2\int_0^L \bar{m}\left[\psi(x)\right]^2 dx. \tag{6}$$

З рівності $V_{\max} = T_{\max}$ отримуємо класичний вираз Релея

$$\omega^2 = \frac{\int_0^L EI\left[\psi''(x)\right]^2 dx}{\int_0^L \bar{m}\left[\psi(x)\right]^2 dx}. \tag{7}$$

Оцінка справедлива для будь-якої пробної функції $\psi(x)$, що задовольняє граничні умови. Використаємо метод Релея для наближених розрахунків власних частот складних систем, використовуючи відповідно підібрані функції $\psi(x)$.

Для однорідної балки точні власні функції $\psi_n(x)$ й власні частоти ω_n відомі. Це служить еталоном для перевірки й оцінки точності апроксимаційних функцій, зокрема при моделюванні фундаментальної моди коливань.

$$\psi_n(x) = \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right), \quad n = 1,2,\ldots \quad \text{і} \quad \omega_n = n^2\pi^2\sqrt{\frac{EI}{\bar{m}L^4}}. \tag{8}$$

Порівняльний аналіз апроксимаційних форм коливань стріли маніпулятора методом Релея полягав у наступному. На початку кожну пробну функцію $\psi_i(x)$ нормували для забезпечення їх порівнянності, зокрема використовувалася умова нормування за масою або залишали з амплітудою A, оскільки масштабний множник не впливає

на кінцеве значення частоти. Для кожної з пробних функцій $\psi_i(x)$, що задовольняють обов'язкові граничні умови шарнірних опорів $\psi(0) = \psi(L) = 0$ та умови гладкості, проводилось обчислення двох ключових інтегралів на відрізку $0 \le x \le L$: чисельника, що визначає максимальну потенційну енергію системи через квадрат другої похідної форми, та знаменника, що відповідає максимальній кінетичній енергії через квадрат самої функції. Ці інтеграли підставлялись у формулу співвідношення Релея (7) для отримання оцінки власної частоти ω_i.

Для підвищення точності параметризованих функцій виконувався чисельний пошук оптимальних значень параметрів, що мінімізують коефіцієнт Релея (тобто найбільш точне наближення до істинного значення ω_1). Усі обчислення пробних функцій ψ_i, включаючи знаходження похідних та інтегрування, проводились чисельно методом трапецій на щільній сітці для забезпечення високої точності. Остаточним етапом було порівняння отриманих частот із точним аналітичним значенням для шарнірно опертої балки $\omega_{exact} = \pi^2\sqrt{EI/(\bar{m}L^4)}$, результати якого представлені у вигляді відношення частот ω_i/ω_{exact} та відсоткової відносної похибки у відсотках $\omega_i/\omega_{exact} - 1) \cdot 100$ %.

Підвищення точності функції, що описує форму коливань стріли маніпулятора, методом Релея здійснено на основі восьми апроксимаційних функцій, кожна з яких задовольняє відповідні граничні умови $\psi(0) = \psi(L) = 0$.

1. Синусоїдальна функція $\psi_1(x) = \sin(\pi x/L)$.

У цьому випадку отримане значення власної частоти є точним еталонним результатом

$$\omega_1^2 = \frac{EI \cdot \frac{\pi^4}{2L^3}}{\bar{m} \cdot \frac{L}{2}} = \frac{\pi^4 EI}{\bar{m}L^4}, \Rightarrow \omega_{exact}.$$

Синусоїдна функція $\psi_1(x)$, забезпечує точне значення власної частоти та слугує теоретично обґрунтованим еталоном та базовим орієнтиром для оцінки точності апроксимаційних функцій.

2. Параболічна функція $\psi_2(x) = x(L - x)$.

Згідно з прийнятою методикою, власна частота набуває значення

$$\omega_2^2 = \frac{EI \cdot 4L}{\bar{m} \cdot (L^5/30)} = \frac{120EI}{\bar{m}L^4}, \Rightarrow \frac{\omega_2}{\omega_{\text{exact}}} = \frac{\sqrt{120}}{\pi^2} \approx 1{,}109918. (\approx +10{,}99\ \%).$$

Параболічна функція $\psi_2(x)$ забезпечує прийнятну точність (похибка ≈ 11 %) у розрахунку власної частоти балки з шарнірними опорами, що робить її доцільною для попередніх інженерних оцінок, де важливі аналітична простота та узгодженість з граничними умовами.

3. Кубічна функція $\psi_3(x) = x(L - x)(1 - 2x/L)$.

На основі застосованого алгоритму отримано значення власної частоти

$$\omega_3^2 = \frac{EI \cdot 12L}{\bar{m} \cdot (L^5/210)} = \frac{2520EI}{\bar{m}L^4}, \Rightarrow \frac{\omega_3}{\omega_{\text{exact}}} = \frac{\sqrt{2520}}{\pi^2} \approx 5{,}08566\ (\approx +408{,}6\ \%).$$

Кубічна функція $\psi_3(x)$ виявилася непридатною для точного моделювання першої моди: відносна похибка становила понад 408 % через надмірний внесок другої похідної $\left[\psi_2''(x)\right]^2$, що штучно підвищує жорсткість. Такий результат підтверджує, що коефіцієнт Релея дає верхню межу власних значень, а точність залежить від відповідності пробної функції форми коливань.

4. Експоненціальна функція

$$\psi_4(x; \alpha) = (e^{\alpha x/L} - 1)(1 - e^{\alpha(x/L - 1)}), \quad \alpha > 0,$$

де α – параметр, який підбирається для мінімізації коефіцієнт Релея.

Аналітичні вирази для інтегралів існують, але є громіздкими через експоненційні множники, тому застосовано чисельний підбір параметра α, що забезпечує мінімальне значення коефіцієнта Релея. У чисельному експерименті найкраще значення $\alpha \approx 0{,}5$ було знайдено на граничному значенні сітки та $E = 210 \cdot 10^9$ Па = 210 ГПа, $I = 42\ 730\ 523$ мм^4 = $4{,}2730523 \cdot 10^{-5}$ м^4, $\bar{m} = 52{,}07$ кг/м, $L = 7{,}0$ м. Тоді у межах обраного підходу власна частота становить

$$\omega_4 = 103{,}69\ \text{рад/с}, \quad \frac{\omega_4}{\omega_{exact}} \approx 1{,}240024\ (\approx +24{,}002\ \%).$$

Експоненціальна функція ψ_4 при фіксованому параметрі дала похибку близько 24 %, що значно гірше за синусоїдальні та статичній апроксимації. Недостатня узгодженість кривизни з реальною формою прогину зумовлює неточність, однак функція має потенціал до збіжності за умови варіаційного підбору параметра α, що робить її перспективною для адаптивного моделювання та параметричного аналізу.

5. Комбінована функція $\psi_5(x; \beta)$.

Використано пробну функцію, що є лінійною комбінацією синусоїдальної та параболічної форм, де β це ваговий коефіцієнт, що визначається варіаційним методом.

$$\psi_5(x;\beta) = \beta \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) + (1-\beta)x(L-x), \quad 0 \le \beta \le 0.$$

У результаті варіаційної мінімізації було встановлено, що оптимальним значенням параметра β є одиниця. Це означає, що комбінована функція $\psi_5(x; \beta)$ з оптимальним параметром β = 1 тотожно дорівнює чистій синусоїдальній функції $\psi_1(x)$, яка є точним розв'язкам для даної системи. Тоді

$$\omega_5 = \omega_{exact}, \quad \frac{\omega_5}{\omega_{exact}} = 1,0.$$

Комбінована функція ψ_5, побудована як поєднання синуса й параболи, при варіаційному підборі параметра β зводиться до чистої синусоїди, що підтверджує її енергетичну перевагу як найточнішого наближення першої моди. Такий результат демонструє ефективність синусоїдальної форми в обмеженому базисному просторі та перспективність комбінованих функцій ψ_5 для моделювання з багатьма базисними елементами.

6. Функція $\psi_6(x)$, що відповідає формі статичного прогину.

Нормовану статичну форму прогину балки, навантаженої поперечною центральною силою, представимо у вигляді системи рівнянь, де константу *C* обрано з умови $\max|\psi_6| = 1$.

$$\psi_6(x)\begin{cases} C\cdot(3L^2x - 4x^3), & 0 \le x \le L/2, \\ C\cdot(3L^2(L-x) - 4(L-x)^3), & L/2 \le x \le L. \end{cases}$$

У результаті прямого чисельного інтегрування без застосування спрощувальних припущень отримано

$$\omega_6 = 84,22 \text{ рад/с}, \quad \frac{\omega_6}{\omega_{exact}} \approx 1,007.$$

Функція $\psi_6(x)$, побудована як суцільна кусочно-аналітична форма статичного прогину, забезпечила високу точність розрахунку власної частоти з похибкою не більше ніж +0,72 %. Це підтверджує ефективність фізично обґрунтованих апроксимацій у методі Релея, які поєднують обчислювальну простоту з точністю, достатньою для інженерних застосувань.

7. Потенціальна функція $\psi_7(x)$.

Функція $\psi_7(x)$, отримана через інтегрування епюри моментів $M(\eta)$ для балки з центральним навантаженням, після відповідного нормування відповідає формі статичного прогину $w_s(x)$, а їх використання у чисельному розрахунку забезпечило повну узгодженість результатів $\psi_6(x)$ та $\psi_7(x)$ (з точністю до константи).

$$\psi_7(x) = \int_0^x \int_0^\xi M(\eta) d\eta d\xi, .$$

$$\omega_7 = \omega_6 = 84,22 \text{ рад/с}, \quad \frac{\omega_7}{\omega_{exact}} \approx 1,007.$$

Функція $\psi_7(x)$, побудована через інтегрування епюр моментів, забезпечила високу точність (+0,72 %) розрахунку власної частоти, підтвердивши ефективність фізично обґрунтованих пробних форм. Цей підхід забезпечує узгодженість статичних і динамічних характеристик, зберігаючи аналітичну простоту.

8. Лінійна функція $\psi_8(x)$

Запропонована функція $\psi_8(x)$, що має аналітично просту форму та задовольняє кінематичні граничні умови, є пропорційною параболічному профілю $\psi_2(x)$ з відмінністю лише у сталому множнику.

$$\psi_8(x) = x - \frac{x^2}{L}.$$

Оскільки коефіцієнт масштабу не впливає на значення коефіцієнта Релея, нормування форми прогину не змінює результатів оцінки власної частоти, тоді

$$\omega_8 = \omega_2 = 10,954451 \text{ рад/с}, \quad \frac{\omega_8}{\omega_{exact}} \approx 1,109918. (\approx +10,99\ \%).$$

Запропонована лінійна функція ψ_8 показала прийнятну для попереднього аналізу точність (похибка +10,99 %), характерну для простих апроксимацій. Незважаючи на обмежене відтворення кривизни, вона забезпечує фізично

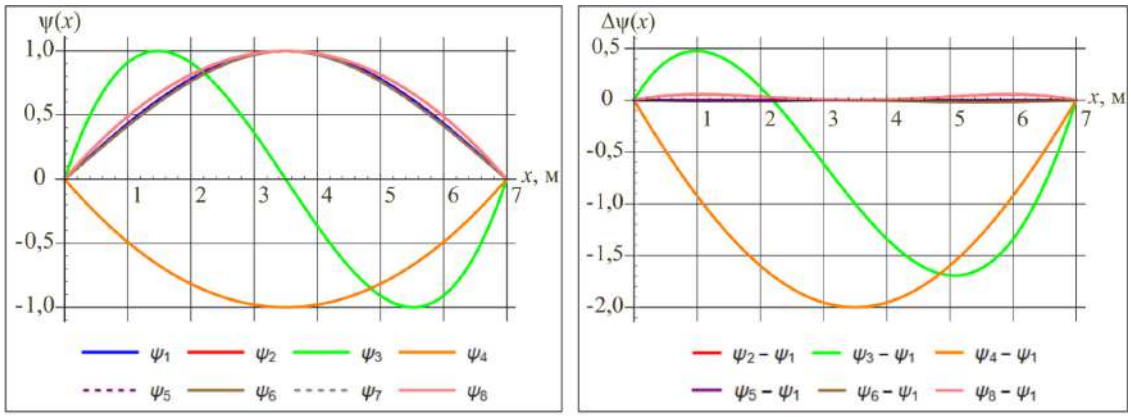
узгоджені результати завдяки виконанню граничних умов та незалежності коефіцієнта Релея від масштабування, що робить її ефективною у задачах попереднього аналізу та для оперативних інженерних оцінок.

Після обґрунтованого вибору та розрахунку пробних функцій ψ_i, було складено зведену таблицю, яка містить розраховані власні частоти та їх відношення до еталонного значення ω_{exact} = 83,6159 рад/с, а також відносні похибки апроксимації (Табл. 1). Для візуальної оцінки якості обраних функцій з використанням Wolfram створено програму та побудовано графіки: перший відображає нормовані форми коливань у порівнянні з точною формою (Рис. 3, *а*), що дозволяє проаналізувати їхню геометричну подібність, а другий ілюструє розподіл абсолютних відхилень, виявляючи зони найбільшої розбіжності (Рис. 3, *б*). Цей підхід дає змогу не лише кількісно оцінити точність кожної пробної функції, але й виявити систематичні відмінності в їхній поведінці на різних ділянках довжини балки.

Таблиця 1

Результати розрахунку пробних функцій ψ_i

Назва пробної функції прогину (ψ)	Позначення (ψ)	ω_i, рад/с	ω_i/ω_{exact}	Відносна похибка (%)
Синусоїдальна функція	ψ_1	83,6159	1,0000	0
Параболічна функція	ψ_2	92,8030	1,1099	+10,99
Кубічна функція	ψ_3	425,2421	5,0857	+408,57
Експоненціальна функція ($\alpha \approx 0{,}5$)	ψ_4	103,6857	1,2400	+24,00
Комбінована функція ($\beta \approx 1{,}0$)	ψ_5	83,6159	1,0000	0
Статична форма	ψ_6	84,2207	1,0072	+0,72
Потенціальна функція	ψ_7	84,2207	1,0072	+0,72
Лінійна функція	ψ_8	92,8030	1,1099	+10,99



а *б*

Рис. 3. Графіки оцінки якості обраних функцій

Проведений аналіз апроксимаційних функцій для оцінки першої власної частоти балки на шарнірних опорах методом Релея виявив чітку закономірність у точності різних пробних форм. Найточніші результати з відносною похибкою менше 1 % отримано для синусоїдальної функції (яка є точним розв'язкам), статичної форми пружної лінії та потенційної функції прогину. Функції з помірною похибкою близько 11 %, параболічна та лінійна, можуть бути прийнятними для попередніх інженерних оцінок. Найменш ефективними виявилися експоненціальна (похибка ≈24 %) та кубічна (похибка понад 400 %) функції, що свідчить про їхню непридатність для точної апроксимації форми коливань. Значущим результатом є те, що оптимізація комбінованої функції призводить до її зведення до чистої синусоїди, що підтверджує енергетичну оптимальність останньої. Таким чином, для моделювання стріли маніпулятора найефективнішими є синусоїдальні та статичні функції, які забезпечують високу точність при збереженні фізичної достовірності моделі.

Висновки

Проведене дослідження підтверджує ефективність методу Релея як надійного засобу для оцінки основної власної частоти коливань стріли маніпулятора, змодельованої у вигляді балки з шарнірними опорами. Ключовим чинником точності розрахунків є вибір пробної функції: апроксимації, що узгоджуються з реальною формою коливань, забезпечують мінімальні відхилення від точного аналітичного розв'язку. Порівняльний аналіз восьми апроксимаційних форм показав, що найвищу точність забезпечують синусоїдна функція, комбінована форма з варіаційним налаштуванням та потенціальна функція згину, отримана через інтегрування епюри моментів. Ці

функції демонструють високу узгодженість з фізичною природою деформації та математичною моделлю, що робить їх доцільними для практичного застосування в інженерних розрахунках і подальшому моделюванні динаміки маніпуляторних систем.

Список використаної літератури

1. Andersson J., Bodin K., Lindmark D., Servin M., Wallin E. Reinforcement learning control of a forestry crane manipulator. *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2021. P. 2121–2126. https://doi.org/10.1109/IROS51168.2021.9636219

2. Bakay B. Ya. Determination of loading in the manipulator type mobile loading machines by the accelerations. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry. 2011. Vol. 37. № 2. P. 52–56. https://forest-woodworking.nltu.edu.ua/index.php/journal/article/view/148

3. Бакай Б. Я. Попереднє представлення рівняння динаміки маніпулятора методом Лагранжа-Ейлера. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2011. Вип. 21, № 18. С. 322–327. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2011/21_18/322_Bak.pdf

4. Andersson J., Bodin K., Lindmark D., Servin M., Wallin E. Reinforcement learning control of a forestry crane manipulator. *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2021. P. 2121–2126. https://doi.org/10.1109/IROS51168.2021.9636219

5. Han S. M., Benaroya H., Wei T. Dynamics of transversely vibrating beams using four engineering theories. *Journal of Sound and Vibration*. 1999. Vol. 225, № 5. P. 935–988. https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.1855

6. Wang X., Zhou W., Yi S., Li S. In-Plane Vibration Analysis of Rectangular Plates with Elastically Restrained Boundaries Using Differential Quadrature Method of Variational Weak Form. *Materials*. 2025. Vol. 18, Iss. 14. 3250. https://doi.org/10.3390/ma18143250

7. Wu X., Wang B., Shi W. Efficient energy-preserving integrators for oscillatory Hamiltonian systems. *Journal of Computational Physics*. 2013. Vol. 235. P. 587–605. https://doi.org/10.1016/j.jcp.2012.10.015

8. Kalpakides V. K., Charalambopoulos A. On Hamilton's principle for discrete and continuous systems: A convolved action principle. *Reports on Mathematical Physics*. 2021. Vol. 87, № 2. P. 225–248. https://doi.org/10.1016/S0034-4877(21)00027-6

9. Ilanko S., Monterrubio L. E., Mochida Y. The Rayleigh-Ritz method for structural analysis. John Wiley & Sons, 2014. https://doi.org/10.1002/9781118984444

10. Zhang L., Tong G. Flexural-torsional buckling of thin-walled beam members based on shell buckling theory. *Thin-Walled Structures*. 2004. Vol. 42, № 12. P. 1665–1687. https://doi.org/10.1016/j.tws.2004.05.004

11. Cao C., Qin Q.-H. Hybrid fundamental solution based finite element method: *Theory and applications. Advances in Mathematical Physics*. 2015. Vol. 2015. Article ID 916029. https://doi.org/10.1155/2015/916029

12. Temple G. The Theory of Rayleigh's Principle as Applied to Continuous Systems. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1928. Vol. 119, № 782. P. 276–293. https://doi.org/10.1098/RSPA.1928.0098

13. Czubacki R., Lewiński T. Application of the Rayleigh quotient method in the analysis of stability of straight elastic bars. *Archives of Civil Engineering*. 2024. Vol. LXX, № 4. P. 85–98. https://doi.org/10.24425/ace.2024.151881

14. Ferrandi G., Hochstenbach M. E. A homogeneous Rayleigh quotient with applications in gradient methods. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2024. Vol. 437. 115440. https://doi.org/10.1016/j.cam.2023.115440

References

1. Mishra N, Singh SP. (2021) Dynamic modelling and control of flexible link manipulators: methods and scope- Part-1. *Indian Journal of Science and Technology. 14*(43):3210-3226. https://doi.org/10.17485/IJST/v14i43.1418-I

2. Bakay B. Ya. (2011). Determination of loading in the manipulator type mobile loading machines by the accelerations. *Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 37*(2). 52–56. https://forest-woodworking.nltu.edu.ua/index.php/journal/article/view/148

3. Bakay B. Y. (2011). Preliminary representation of the equation of dynamics of the manipulator by method Euler-Lagrange. *Scientific Bulletin of UNFU, 21*(18), 322–327. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2011/21_18/322_Bak.pdf

4. Andersson J., Bodin K., Lindmark D., Servin M., & Wallin E. (2021) Reinforcement learning control of a forestry crane manipulator, in *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2121–2126, 2021. https://doi.org/10.1109/IROS51168.2021.9636219

5. Han S. M., Benaroya H., & Wei T. (1999). Dynamics of transversely vibrating beams using four engineering theories. *Journal of Sound and Vibration, 225*(5), 935-988. https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.1855

6. Wang X., Zhou W., Yi S., & Li S. (2025). In-Plane Vibration Analysis of Rectangular Plates with Elastically Restrained Boundaries Using Differential Quadrature Method of Variational Weak Form. *Materials*, *18*(14), 3250. https://doi.org/10.3390/ma18143250

7. Wu X., Wang B., & Shi W. (2013). Efficient energy-preserving integrators for oscillatory Hamiltonian systems. *Journal of Computational Physics, 235*, 587–605. https://doi.org/10.1016/j.jcp.2012.10.015

8. Kalpakides V. K., & Charalambopoulos A. (2021). On Hamilton's principle for discrete and continuous systems: A convolved action principle. *Reports on Mathematical Physics, 87*(2), 225–248. https://doi.org/10.1016/S0034-4877(21)00027-6

9. Ilanko S., Monterrubio L. E., & Mochida Y. (2014). *The Rayleigh-Ritz method for structural analysis*. John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781118984444

10. Zhang L., & Tong G. (2004). Flexural-torsional buckling of thin-walled beam members based on shell buckling theory. *Thin-Walled Structures, 42*(12), 1665–1687. https://doi.org/10.1016/j.tws.2004.05.004

11. Cao C., & Qin Q.-H. (2015). Hybrid fundamental solution based finite element method: Theory and applications. *Advances in Mathematical Physics*, 2015, Article 916029. https://doi.org/10.1155/2015/916029

12. Temple G. (1928). The Theory of Rayleigh's Principle as Applied to Continuous Systems. *Proceedings of The Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *119*(782), 276–293. https://doi.org/10.1098/RSPA.1928.0098

13. Czubacki R., & Lewiński T. (2024). Application of the Rayleigh quotient method in the analysis of stability of straight elastic bars. *Archives of Civil Engineering, LXX*(4), 85–98. https://doi.org/10.24425/ace.2024.151881

14. Ferrandi G., & Hochstenbach M. E. (2024). A homogeneous Rayleigh quotient with applications in gradient methods. *Journal of Computational and Applied Mathematics, 437*, 115440. https://doi.org/10.1016/j.cam.2023.115440

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 621.785:620.193:631.3 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.28

М. В. РОГАНІН
аспірант кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0009-0002-9230-9015

О. О. ГОНЧАРЕНКО
кандидат технічних наук,
доцент кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-4325-2705

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНОСУ І ВІДНОВЛЕННЯ ТВЕРДОСПЛАВНИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ

Актуальність дослідження зумовлено необхідністю забезпечення довговічності та надійності деталей машин сільськогосподарського призначення, які працюють у складних умовах абразивного, корозійного та динамічного навантаження. Встановлено, що традиційні підходи до оцінювання ресурсу не враховують комбінованих механізмів руйнування та ефективності застосування відновлювальних технологій, що призводить до зростання експлуатаційних витрат і зниження продуктивності техніки.

Мета статті полягає у формуванні науково обґрунтованих підходів до прогнозування довговічності деталей машин аграрного призначення шляхом аналізу процесів зношування твердосплавних сталей та оцінювання впливу відновлювальних технологій на продовження їх ресурсу.

Методологія дослідження базується на системному аналізі експлуатаційних умов, що визначають характер деградації матеріалу, класифікації механізмів зношування, порівнянні ефективності сучасних технологій відновлення, а також побудові інтегрованої моделі прогнозування ресурсу деталей. Використано узагальнення експериментальних даних, результати аналізу ремонтних практик та елементи математичного моделювання з урахуванням багатофакторного впливу навантажень.

Результати дослідження полягають у виявленні закономірностей впливу абразивних, адгезійних, втомних і корозійних механізмів на втрату працездатності деталей. Доведено, що ізольовані механізми зносу майже не зустрічаються, а превалюють комбіновані сценарії, які прискорюють деградацію. Оцінено ефективність сучасних технологій відновлення (наплавлення, плазмове напилення, лазерне легування, хіміко-термічне оброблення), завдяки яким строк служби деталей може бути подовжено в 1,5–3 рази.

Висновки підтверджують, що використання інтегрованого підходу забезпечує можливість переходу від реактивних ремонтів до планово-попереджувальних, знижує аварійні простої та підвищує економічну ефективність сільськогосподарського виробництва. Виявлено обмеження, пов'язані з нестачею даних для валідації моделей, недостатньою стандартизацією методик та складністю інтеграції цифрових систем моніторингу.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням методів інтеграції сенсорного моніторингу в модельні схеми, створенням великих баз даних для алгоритмів машинного навчання, а також з економічним обґрунтуванням упровадження технологій прогнозування довговічності у виробничу практику.

Ключові слова: *абразивне зношування, комбіновані механізми руйнування, залишковий ресурс, відновлювальні технології, прогнозна модель технічний сервіс машинно-тракторного парку, корозія, довговічності деталей, відновлення деталей.*

M. V. ROHANIN
Postgraduate Student at the Department of Agricultural Engineering
and Road Transport
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0009-0002-9230-9015

O. O. HONCHARENKO
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Agricultural Engineering
and Road Transport
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-4325-2705

© Роганін М. В., Гончаренко О. О., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

MODELING OF WEAR AND RESTORATION PROCESSES OF HARD-ALLOY STEELS FOR PREDICTING THE DURABILITY OF MACHINE PARTS

The relevance of this study is determined by the need to ensure the durability and reliability of agricultural machinery parts that operate under complex abrasive, corrosive, and dynamic loading conditions. It has been established that traditional approaches to service life assessment do not account for combined degradation mechanisms or the effectiveness of restoration technologies, which leads to higher operating costs and reduced equipment productivity.

The aim of the article is to develop scientifically justified approaches to predicting the durability of agricultural machinery parts by analyzing the wear processes of hard-alloy steels and assessing the impact of restoration technologies on extending their service life.

The research methodology is based on a systematic analysis of operating conditions that define material degradation, classification of wear mechanisms, comparison of the effectiveness of modern restoration technologies, and the development of an integrated model for predicting the service life of parts. The study incorporates the generalization of experimental data, analysis of repair practices, and elements of mathematical modeling that consider the multifactorial impact of loads.

The results revealed the patterns of influence of abrasive, adhesive, fatigue, and corrosive mechanisms on the loss of part functionality. It was proven that isolated wear mechanisms are rare, while combined scenarios prevail and accelerate degradation. The effectiveness of modern restoration technologies, including surfacing, plasma spraying, laser alloying, and chemical-thermal treatment, was assessed, demonstrating that the service life of parts can be extended by 1.5 to 3 times.

The conclusions confirm that the integrated approach enables a shift from reactive repairs to preventive maintenance, reduces emergency downtime, and improves the economic efficiency of agricultural production. The study also identified limitations related to insufficient data for model validation, lack of standardized methodologies, and challenges in integrating digital monitoring systems.

Future research should focus on developing methods for integrating sensor monitoring into modeling schemes, creating large datasets for machine learning algorithms, and providing economic justification for the implementation of durability prediction technologies in industrial practice.

Key words: *abrasive wear, combined failure mechanisms, residual life, restoration technologies, predictive model, technical service of machine and tractor fleet, corrosion, durability of parts, restoration of parts.*

Постановка завдання

Моделювання процесів зносу і відновлення твердосплавних сталей є важливим завданням у контексті забезпечення надійності та довговічності деталей машин сільськогосподарського виробництва. Робочі елементи техніки в умовах інтенсивного механічного навантаження, абразивного і корозійного середовища зазнають прискореного руйнування, що призводить до втрати працездатності та зростання експлуатаційних витрат. Проблема ускладнюється високою вартістю виготовлення нових деталей та необхідністю підтримання стабільності роботи машинно-тракторного парку в умовах сезонних пікових навантажень.

Розроблення математичних моделей, що дозволяють описати механізми зношування та прогнозувати залишковий ресурс деталей, має прямий зв'язок із практичними завданнями підвищення ефективності експлуатації сільськогосподарської техніки. Такі підходи забезпечують можливість планування ремонтів, обґрунтування вибору оптимальних технологій відновлення та мінімізації простоїв обладнання. Водночас результати дослідження відкривають перспективи підвищення продуктивності та конкурентоспроможності аграрного виробництва завдяки раціональному використанню технічних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наукові праці, присвячені моделюванню процесів зносу і відновлення твердосплавних сталей для прогнозування довговічності деталей, узагальнюються в чотирьох напрямах. У першому напрямі увагу зосереджено на інтеграції ремонтних технологій і зменшенні екологічного навантаження. А. Атинян (A. Atynian), С. Братішко (S. Bratishko), С. Бутнік (S. Butnik) та співавтори [1] доводять ефективність застосування вуглепластикових композитів у ремонті мостових споруд, що може слугувати моделлю включення ремонтних сценаріїв у прогноз довговічності сталевих вузлів. О. О. Коростін [2] обґрунтовує підходи до зменшення вуглецевого сліду за тренування великих ML-моделей, що у сфері матеріалознавства означає доцільність створення енергоефективних алгоритмів прогнозування зносу. М. Павловський (M. Pavlovskyi) [3] аналізує вплив біодизельних палив на ефективність двигунів та зношування елементів, що опосередковано впливає на трибологічну поведінку сталей у транспортних системах. Подальші дослідження в цьому напрямі мають інтегрувати екологічні обмеження та реальні умови використання в цифрові двійники довговічності.

Другий напрям охоплює процесно-трибологічні аспекти. Зокрема, Х. Лі (X. Li), Ч. Чжай (C. Zhai), В. Хе (W. He) та співавтори [4] виявляють закономірності інтенсивності зносу за ВТА-свердління легованої сталі, що дозволяє моделювати перехід між механізмами абразивного та адгезійного зносу. К. Костик (K. Kostyk), І. Курич (I. Kuric), М. Сага (M. Saga) та співавтори [5] показують, що комбіноване магнітно-імпульсне та хіміко-термічне оброблення створює поверхневі шари з підвищеною твердістю і стійкістю до зношування. Л. Гао (L. Gao), С. Сюй (C. Xu), С. Ге (X. Ge) та співавтори [6] доводять значення дифузійного з'єднання порошкових та легованих сталей

для підвищення втомної довговічності, що актуально для моделювання інтерфейсних зон. Залежність трибологічних характеристик сталі Q355D від відношення кування показують Дж. Хуан (J. Huang), Дж. Сюй (J. Xu), С. Ву (X. Wu) та співавтори [7]. Л. Селвам (L. Selvam), В. Ганапаті (V. Ganapathy), П. Арумугам (P. Arumugam) та співавтори [8,17] зосереджують увагу на окиснювальній стабільності наплавлених шарів, що визначає їх зносостійкість у високотемпературних умовах. Подальші роботи у цьому напрямі мають бути націлені на створення універсальних моделей зносу з урахуванням історії деформації та впливу інтерфейсних структур.

Третій науковий напрям стосується інженерії поверхні, покриттів та відновлювальних технологій. Р. Бендікєне (R. Bendikiene), А. Чупліс (A. Ciuplys) та Л. Каваляускєне (L. Kavaliauskiene) [9] демонструють можливість повторного використання металевих відходів для створення високозносостійких покриттів, що узгоджується з принципами циркулярної економіки. С. Сонг (C. Song), С. Ху (S. Hu), Ц. Хан (Q. Han) та співавтори [10] демонструють переваги градієнтних наноструктурованих сталей, які забезпечують вищу зносостійкість за підвищених температур. Вплив постійного струму на твердість наплавлених покриттів виявляють М. Н. Муїгай (M. N. Muigai), Е. Т. Акінлабі (E. T. Akinlabi), Ф. М. Мвема (F. M. Mwema) [11]. Х. Є (H. Ye), А. Чен (A. Chen), С. Лю (S. Liu) і співавтори [12] доводять ефективність ультразвукового поверхневого обкочування в покращенні трибологічних властивостей алюмінієвої бронзи, а П. Хуан (P. Huang), Ю. Ван (Y. Wang), Дж. Лінь (J. Lin) та співавтори [13] підтверджують аналогічний ефект для підшипникових сталей. Надалі дослідження варто спрямувати на створення багатофакторних «карт відповідності» між енергією поверхневого оброблення та параметрами зносостійкості.

Четвертий напрям досліджень акцентовано на впливі експлуатаційних середовищ. Б. Ван (B. Wang), Ю. Го (Y. Guo), Ч. Чжан (Z. Zhang) та співавтори [14] аналізують кріогенний знос сплаву Invar 36 проти Si_3N_4, показуючи, що температура радикально змінює механізми тертя. Ф. Їнь (F. Yin), Ю. Ван (Y. Wang), Х. Цзі (H. Ji), Ч. Ма (Z. Ma), С. Ніє (S. Nie) [15, 16] доводять, що швидкість ковзання і наявність морської води суттєво змінюють трибологічну поведінку сталевих пар у контакті з SiC (silicon carbide). Це підтверджує необхідність багатофізичних моделей, що враховують трибокорозію і граничні умови експлуатації. Подальші дослідження доцільно зосередити на багатофізичних випробуваннях у кріогенних, морських та високотемпературних умовах для комплексної валідації прогнозних моделей.

Таким чином, наявні дослідження підтверджують потребу у створенні гібридних моделей довговічності твердосплавних сталей, що поєднують механістичні закони зносу, параметри мікроструктури, сценарії ремонту та експлуатаційні фактори середовища.

Попри значні досягнення у вивченні процесів зношування твердосплавних сталей, низка аспектів залишається не досить дослідженою. Наявні роботи переважно зосереджені на описі умов експлуатації та загальних факторів зношування, однак бракує систематизованого уявлення про їх комплексний вплив у реальних виробничих умовах. Обмеженою є також інформація щодо ефективності сучасних відновлювальних технологій у динамічному режимі роботи машин, адже більшість оцінок ґрунтується на лабораторних або фрагментарних польових дослідженнях. Відсутність уніфікованих методик та узгоджених моделей прогнозування довговічності ускладнює перенесення результатів у практику, що створює розрив між теоретичними розробками і потребами машинобудування та аграрного виробництва.

Запропоноване дослідження спрямовано на заповнення зазначених прогалин шляхом побудови інтегрованої моделі прогнозування довговічності, яка поєднує дані про умови експлуатації, чинники інтенсивності зношування та ефективність відновлювальних процесів. Залучення комплексного аналізу механізмів руйнування й оцінювання сучасних технологій відновлення дозволить сформувати більш достовірні та практично орієнтовані результати. Очікується, що така модель стане основою для переходу від загальних теоретичних підходів до прикладних інструментів планування технічного обслуговування, що сприятиме підвищенню надійності деталей і ефективності виробничих процесів.

Формулювання мети дослідження

Мета статті полягає в науковому обґрунтуванні підходів до прогнозування довговічності деталей машин сільськогосподарського призначення на основі аналізу процесів зносу і відновлення твердосплавних сталей.

Для досягнення мети передбачено виконання таких **завдань**:

1) схарактеризувати умови експлуатації та визначити ключові фактори, що впливають на інтенсивність зношування твердосплавних сталей і втрату працездатності деталей машин;

2) оцінити потенціал сучасних технологій відновлення та виявити проблеми, які стримують їх практичне застосування в прогнозуванні довговічності;

3) розробити інтегровану модель прогнозування довговічності деталей на основі поєднання даних про зношування та ефективність відновлювальних процесів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Умови експлуатації деталей машин істотно впливають на інтенсивність і характер зношування твердосплавних сталей. У сільськогосподарському виробництві вони працюють у складних середовищах, де поєднуються динамічні навантаження, абразивний вплив ґрунтових частинок, змінна вологість і агресивна дія добрив. Сукупність

цих чинників призводить до прискореного руйнування робочих поверхонь, утрати геометричної точності та зниження ефективності техніки. Для обґрунтованого прогнозування довговічності деталей важливо не лише врахувати матеріал і конструктивні особливості, а й чітко ідентифікувати експлуатаційні умови, що визначають механізми зношування (табл. 1).

Таблиця 1

Основні умови експлуатації деталей машин та їх вплив на знос твердосплавних сталей

Умова експлуатації	Характер впливу	Типові наслідки для деталей
Абразивна дія ґрунтових частинок	Механічне руйнування поверхневого шару	Інтенсивне стирання, поява мікрорельєфу
Змінні динамічні навантаження	Періодичне перевантаження матеріалу	Втомне руйнування, мікротріщини
Вологість і агрохімічні реагенти	Корозійно-механічне поєднання процесів	Прискорена деградація сплаву, корозійне зношування
Нестабільність температурного режиму	Термомеханічні напруження	Локальне відшаровування та зниження твердості

Джерело: сформовано на підставі [1, p. 220–222; 2, p. 45–47; 4; 5; 7, p. 935–938]

У практичній експлуатації сільськогосподарських машин поєднання зазначених умов формує складні механізми деградації твердосплавних сталей, що потребують комплексного аналізу. Абразивна дія мінеральних та органічних частинок ґрунту призводить до поступового руйнування мікроструктури поверхневих шарів, утворення борозен та мікроподряпин, які згодом трансформуються в концентратори напружень. Динамічні навантаження, що виникають під час роботи з неоднорідними й ущільненими ґрунтами, спричиняють циклічні коливання напружень у матеріалі, що сприяє розвитку втомних мікротріщин і локальних зон пластичної деформації. Корозійно-активне середовище, зумовлене дією добрив та підвищеної вологості, посилює ці процеси шляхом утворення електрохімічних елементів на поверхні деталі, прискорюючи руйнування структурних складників сплаву.

Термомеханічні впливи, які проявляються внаслідок різких змін температури під час роботи техніки, додатково стимулюють локальне відшаровування покриттів та зниження мікротвердості робочих поверхонь [4]. На практиці це означає, що лемеші плугів, диски борін та інші елементи ґрунтообробної техніки втрачають свою ефективність значно швидше, ніж передбачено нормативними строками служби. У результаті господарства стикаються з необхідністю частих ремонтів або заміни деталей, що підвищує витрати на технічне обслуговування та знижує продуктивність виробничих процесів. Водночас у разі застосування сучасних відновлювальних технологій, як-от наплавлення зносостійкими сплавами чи лазерне легування, стає можливим істотне зменшення негативного впливу перелічених факторів та подовження ресурсу деталей. Таким чином, системний облік умов експлуатації є ключовим чинником для створення достовірних моделей прогнозування довговічності твердосплавних сталей і практичної оптимізації технологій відновлення в сільськогосподарському машинобудуванні.

Зношування твердосплавних сталей у деталях машин відбувається не як ізольований процес, а як результат взаємодії кількох видів навантажень, що формують комбіновані механізми руйнування. У реальних умовах експлуатації абразивна дія, тертя ковзання, циклічні динамічні напруження та вплив агресивного середовища взаємно підсилюють один одного, спричиняючи прискорену втрату працездатності матеріалу. Розуміння механізмів формування різних видів зношування є ключовим для побудови адекватних моделей прогнозування довговічності (табл. 2).

Таблиця 2

Основні види зношування твердосплавних сталей та механізми їх формування

Вид зношування	Умови виникнення	Механізм формування	Практичні наслідки
Абразивне	Контакт із ґрунтовими частинками високої твердості	Вибивання мікрочастинок, подряпини, руйнування мікроструктури	Стирання робочих кромок, зменшення товщини шару
Адгезійне	Ковзання метал-метал за підвищених навантажень	Місцеве зварювання поверхонь, відрив частинок	Залипання, виривання матеріалу, збільшення шорсткості
Втомне	Циклічні динамічні навантаження	Накопичення пошкоджень, розвиток мікротріщин	Локальні руйнування, відколювання фрагментів
Корозійне	Волога, агрохімічні речовини, добрива	Електрохімічні реакції, руйнування фаз	Прискорена деградація поверхні, поява корозійних осередків
Комбіноване	Поєднання абразивного, втомного та корозійного впливу	Синергетична дія механічних і хімічних процесів	Швидка втрата працездатності, непередбачувані відмови

Джерело: сформовано на підставі [6; 7, p. 939–941; 8; 10; 11]

У реальних умовах експлуатації ізольовані види зношування трапляються рідко, тоді як переважає їх комплексна взаємодія, що зумовлює складний характер деградації твердосплавних сталей. Абразивне зношування, спричинене дією мінеральних включень ґрунту, є визначальним для робочих органів ґрунтообробної техніки. Воно проявляється у формуванні характерного хвилястого мікрорельєфу на поверхні лемешів плугів і різців

культиваторів, що призводить до втрати геометричної точності та зростання енергоспоживання машин. Адгезійне зношування, пов'язане з локальним схоплюванням контактних поверхонь, часто реєструється на вузлах тертя зернозбиральних комбайнів, де високі питомі тиски і недостатня мастильна плівка спричиняють виривання матеріалу й утворення задирок [5].

Втомне зношування, характерне для деталей, що працюють під дією змінних навантажень, проявляється на дисках борін і зубах роторних фрез. Тут унаслідок циклічного навантаження відбувається поступове накопичення мікропошкоджень, що трансформуються в тріщини й відколювання частин робочої поверхні. Корозійне зношування особливо інтенсивне у вологих середовищах, збагачених агрохімікатами: наприклад, сошники сівалок у разі контакту з добривами втрачають до 20–30 % ресурсу через локальні осередки корозії, які слугують ініціаторами руйнування. Комбіновані процеси найчастіше фіксуються в багатофункціональних машинах, де деталі піддаються одночасно абразивному стиранню, циклічним навантаженням та хімічному впливу.

Ці приклади свідчать, що правильне розмежування та аналіз механізмів зношування має не лише теоретичне, а й практичне значення. Відповідна діагностика дозволяє обґрунтувати вибір способів поверхневого зміцнення – від наплавлення карбідами до лазерного легування або плазмового напилення. Так, урахування механізмів комбінованого зношування є критично важливим для створення точних моделей прогнозування довговічності та забезпечення економічної доцільності у використанні відновлювальних технологій.

Відновлення твердосплавних сталей є одним із ключових напрямів подовження строку служби деталей машин, що працюють в умовах інтенсивного абразивного та корозійного зношування. Використання сучасних технологій дозволяє не лише компенсувати втрати матеріалу, але й підвищити зносостійкість робочих поверхонь шляхом зміни їхньої мікроструктури та фізико-механічних властивостей. Вибір технології залежить від характеру зношування, вимог до точності відновленої деталі та економічної доцільності у виробничих умовах (табл. 3).

Таблиця 3

Сучасні технології відновлення деталей із твердосплавних сталей та їх потенціал

Технологія	Принцип дії	Типові сфери застосування	Ефективність подовження ресурсу
Наплавлення зносостійкими сплавами	Нанесення шару металу з карбідними включеннями	Лемеші плугів, ножі культиваторів	Подовження ресурсу у 2–2,5 раза
Плазмове та газотермічне напилення	Осадження тонкого шару зносостійкого матеріалу	Диски борін, зуби роторних фрез	Підвищення стійкості до втоми на 40–60 %
Лазерне легування	Локальна зміна структури поверхневого шару	Сошники сівалок, ріжучі елементи	Зростання мікротвердості в 1,5–2 рази
Хіміко-термічне оброблення (борування, азотування)	Дифузійне насичення поверхні неметалевими елементами	Робочі органи машин для внесення добрив	Підвищення корозійної стійкості на 30–50 %

Джерело: сформовано на підставі [5; 8; 9, p. 1228–1230; 12; 13; 14, p. 150–153]

Зокрема, наплавлення порошковими дротами використовується в господарствах для відновлення лемешів і культиваторних лап, що дозволяє збільшити їх строк служби в середньому вдвічі та скоротити витрати на закупівлю нових деталей [5]. Плазмове напилення композиційних покриттів активно впроваджується в ремонті дискових борін, оскільки воно забезпечує високу адгезію та підвищує стійкість до комбінованого абразивно-втомного зношування [9, p. 1228–1230]. Лазерне легування знаходить застосування для деталей, де критичною є точність геометрії, адже воно дозволяє локально зміцнити поверхню без надлишкової деформації чи зміни розмірів [13]. Хіміко-термічне оброблення, особливо азотування, є ефективним для деталей, що працюють у контакті з агрохімікатами, наприклад, сошників машин для внесення мінеральних добрив [14, p. 150–153]. Практичний досвід підтверджує, що правильно вибрана технологія відновлення може не лише подовжити строк служби у 1,5–3 рази, але й підвищити надійність техніки, зменшити кількість аварійних зупинок та оптимізувати витрати на технічне обслуговування.

Методи прогнозування довговічності деталей машин на основі аналізу процесів зносу та відновлення твердосплавних сталей демонструють значний науковий потенціал, однак їх практичне впровадження у виробничих умовах стикається з низкою об'єктивних проблем. Найбільш істотним обмеженням є складність адекватного врахування змінності експлуатаційних умов [4]. Виробнича техніка працює в широкому діапазоні навантажень і середовищ, що змінюються навіть у межах одного робочого циклу, тоді як більшість моделей ґрунтуються на усереднених параметрах, що знижує точність прогнозів [10; 15].

Важливою проблемою є також недостатня стандартизація методів випробувань і вимірювань. У різних лабораторіях використовуються відмінні критерії оцінювання зносостійкості, що ускладнює порівняння результатів і створення універсальних моделей [6; 11]. Відсутність єдиної методичної бази призводить до фрагментарності даних та їх неповної придатності для промислових розрахунків.

Технічною перешкодою виступає обмежена можливість перенесення результатів лабораторних випробувань на реальні умови експлуатації. Багато моделей побудовані на основі даних стендових досліджень, де вплив

факторів є контрольованим і частково ізольованим. У виробничій практиці ж зношування формується під дією комбінаційних навантажень, що значно знижує адекватність таких моделей.

Не менш суттєвою є проблема оперативності збору та оброблення експлуатаційних даних. Для якісного прогнозування потрібен моніторинг стану деталей у режимі реального часу, проте сучасні системи сенсорного контролю ще не мають широкого розповсюдження в сільськогосподарському машинобудуванні через їх вартість і складність інтеграції [2, p. 46–48]. Це обмежує можливості практичного використання адаптивних моделей.

Організаційно-економічні чинники також відіграють вагому роль. Впровадження моделей прогнозування потребує додаткових витрат на обладнання, програмне забезпечення та підготовку персоналу, що не завжди є доцільним для підприємств із невеликим виробничим обсягом. Часто відсутні й стимули до застосування довгострокових стратегій технічного обслуговування, оскільки підприємства орієнтуються на мінімізацію короткострокових витрат [1, p. 220–222].

Ще одним бар'єром виступає обмежена інтеграція цифрових інструментів. Сучасні системи управління технічним станом машин рідко включають модулі прогнозування довговічності, тому навіть наявні математичні моделі залишаються у сфері наукових досліджень і не трансформуються в інженерні рішення [6]. Додатково слід відзначити низьку доступність великих масивів даних, необхідних для навчання і валідації сучасних моделей, зокрема тих, що ґрунтуються на методах машинного навчання.

Запропонована модель призначена для прогнозування довговічності деталей шляхом інтеграції експлуатаційних даних про зношування з оцінюванням ефективності відновлювальних процесів. Актуальність підходу полягає в необхідності врахування комбінованих механізмів руйнування та реальних відновних утручань, які змінюють як поточний стан пошкодження, так і параметри матеріалу. Відмінність від наявних рішень полягає в поєднанні фізично обґрунтованої кінетики зносу з даними сенсорного моніторингу та реєстру ремонтів, трактуванні відновлення як «неідеального» обслуговування з частковим поверненням ресурсу і корекцією матеріалознавчих параметрів, а також у вбудованій оцінці невизначеності прогнозу. Ядром є безрозмірна змінна пошкодження

$$D(t) \in [0,1] \tag{1}$$

з еволюцією під час роботи

$$D' = F(x(t), \theta), \tag{2}$$

де $x(t)$ – вектор навантажень і середовищних факторів, θ – ідентифіковані параметри.

Моменти відновлення τk описуються відображенням стану

$$D(\tau k+) = \varphi(D(\tau k-), uk, \psi) \tag{3}$$

та оновленням параметрів

$$\theta \leftarrow \Theta(\theta, uk),$$

де uk – вибрана технологія відновлення, ψ – її ефективність. Відмова фіксується за умов $D \geq D_{crit}$; прогнозований залишковий ресурс – момент досягнення порогу з урахуванням поточного стану, історії навантажень і виконаних відновлень, із формуванням довірчих інтервалів для прийняття рішень (рис. 1). Практичне функціонування схеми передбачає постійний прийом експлуатаційних даних від бортових сенсорів і періодичне завантаження сервісної інформації про фактичні відновлення. На етапі узгодження часових рядів модель відсіює некоректні ділянки та нормує навантаження до порівнюваних метрик. Алгоритм виділяє інформативні ознаки: рівні контактного тиску, швидкість ковзання, гранулометричні індикатори абразиву, циклічність навантажень, індекси корозійної активності середовища.

Декомпозиція дозволяє кількісно оцінити внесок окремих механізмів у приріст пошкодження, що забезпечує коректну калібровку функції F для конкретних умов роботи. Гібридна модель у режимі онлайн оцінює поточний стан $D(t)$, прогнозує час досягнення порогу працездатності й симулює альтернативні стратегії: зміну режимів експлуатації або застосування різних технологій відновлення. Події відновлення моделюються як часткове «омолодження» із двома ефектами: миттєвим зменшенням D та зміною параметрів матеріалу, що зумовлює інший нахил кривої зносу після сервісу. Байєсівська ідентифікація забезпечує адаптацію параметрів до індивідуальної історії деталі й формує довірчі інтервали для RUL, що важливо для планування обслуговування з урахуванням ризику. У виробничому застосуванні це дає можливість переходу від реактивних ремонтів до планово-попереджувальних, вибору економічно доцільної технології відновлення під конкретний профіль навантажень, скорочення аварійних простоїв і підвищення використання ресурсу деталей. Після кожного сервісу модель автоматично оновлюється за результатами виміряної товщини шару, мікротвердості та фактичної динаміки зносу, зменшуючи похибку наступних прогнозів і забезпечуючи стійку роботу в змінних умовах експлуатації.

Висновки

У дослідженні встановлено, що знос твердосплавних сталей у деталях машин формується під дією комплексу абразивних, адгезійних, втомних і корозійних механізмів, які найчастіше взаємодіють між собою, створюючи комбіновані сценарії деградації. Це зумовлює необхідність розглядати процес втрати ресурсу як багатофакторний

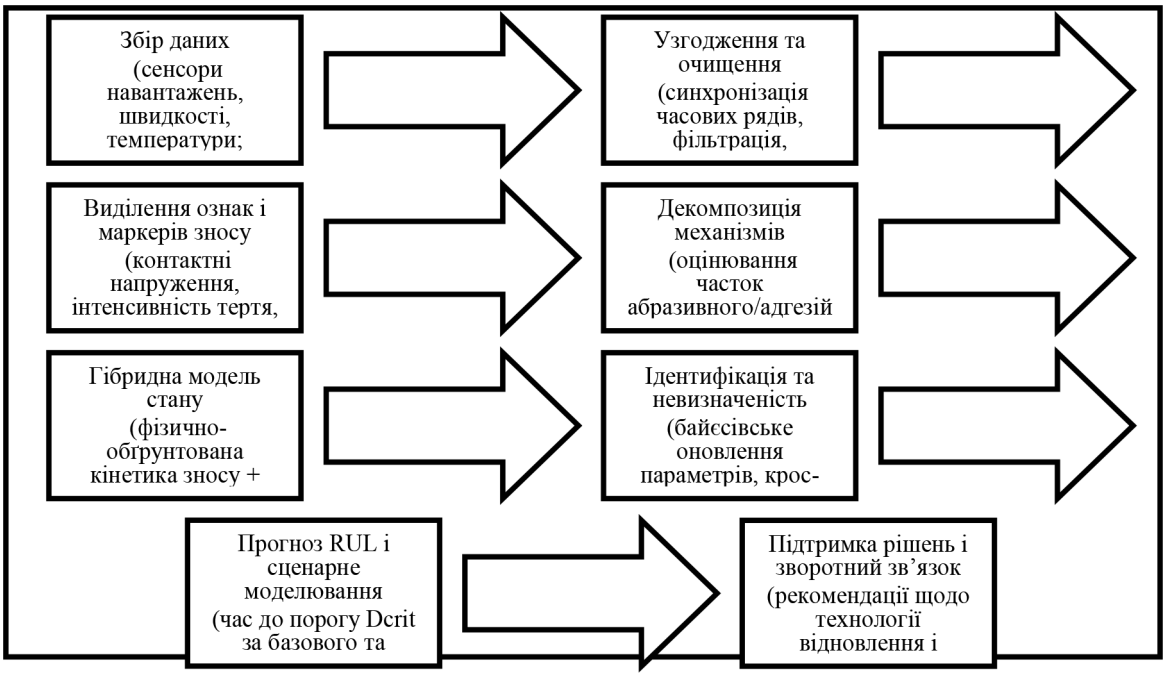


Рис. 1. Покрокова модель інтегрованого прогнозування довговічності

Джерело: авторська розробка

і динамічний, що прямо впливає на точність прогнозування довговічності. Систематизація експлуатаційних умов дала змогу визначити чинники, що найбільше прискорюють руйнування робочих поверхонь, та окреслити критичні межі їх впливу.

Виявлено низку проблем, які стримують практичне застосування методів прогнозування, а саме: невідповідність між результатами лабораторних випробувань і реальними умовами роботи, відсутність єдиних методик оцінювання зносостійкості, недостатній розвиток сенсорних систем для моніторингу стану деталей у реальному часі, а також обмежена інтеграція цифрових інструментів у системи технічного обслуговування. Додатковими бар'єрами є висока вартість упровадження моделей і недостатня готовність підприємств до використання довгострокових стратегій управління ресурсом.

Запропонована модель прогнозування довговічності відрізняється інтеграцією даних про поточне зношування з оцінюванням ефективності відновлювальних технологій, трактуючи ремонт як часткове відновлення ресурсу з корекцією параметрів матеріалу. Такий підхід дозволяє точніше оцінювати залишковий ресурс, ураховувати невизначеність прогнозів і формувати сценарії технічного обслуговування, що переводить практику від реактивних ремонтів до планово-попереджувальних.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробленні методик інтеграції сенсорного моніторингу в прогнозні моделі, створенні баз даних для алгоритмів машинного навчання, а також економічно обґрунтованих стратегій вибору відновлювальних технологій для різних типів деталей. Це дозволить сформувати більш універсальні та адаптивні підходи до управління технічним ресурсом і підвищити ефективність аграрного машинобудування.

Список використаної літератури

1. Atynian A., Bratishko S., Butnik S., Zhyhlo A., Buhaevskyi V. Use of carbon composites in repair of overpasses and bridges. *Věda a perspektivy*. 2024. № 8(39). P. 213–225. DOI: https://doi.org/10.52058/2695-1592-2024-8(39)-213-225.

2. Коростін О. О. Підходи до зменшення вуглецевого сліду в тренуванні великих ML-моделей. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 1. С. 40–51. DOI: https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.1.5 (дата звернення: 08.03.2025).

3. Pavlovskyi M. The improvement of fuel efficiency and environmental characteristics of diesel engine by using biodiesel fuels. In: Boichenko S., Zaporozhets A., Yakovlieva A., Shkilniuk I. (eds.) *Modern technologies in energy and transport*. (*Studies in Systems, Decision and Control*; Vol. 510). Cham: Springer, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_4

4. Li X., Zhai C., He W., Lu Y., Zhang B. Experimental investigation of tool wear and machining quality of BTA deep-hole drilling in low-carbon alloy steel SA-5083. *Materials*. 2023. Vol. 16, № 20. Article 6686. DOI: https://doi.org/10.3390/ma16206686

5. Kostyk K., Kuric I., Saga M., Kostyk V., Ivanov V., Kovalov V., Pavlenko I. Impact of magnetic-pulse and chemical-thermal treatment on alloyed steels' surface layer. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, № 1. Article 469. DOI: https://doi.org/10.3390/app12010469

6. Gao L., Xu C., Ge X., Hu Q., Wang X., Meng Y., Liu B. Study on microstructure and properties between alloy steel and powder steel via hot isostatic pressing diffusion bonding. *Materials Today Communications*. 2024. Vol. 41. Article 110390. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110390

7. Huang J., Xu J., Wu X., Wang C., Jin C., Ji X., Han T. Effects of different forging ratios on microstructure, mechanical properties and friction and wear behaviour of Q355D steel. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2025. Vol. 64, № 3. P. 927–942. DOI: https://doi.org/10.1080/00084433.2024.2398933

8. Selvam L., Ganapathy V., Arumugam P., Ramarathinam R. P., Ramdas P. V., Palanivel A., Rajendran V. A study of oxidation behaviour of hard-faced surface on steel using SMAW. *AIP Conference Proceedings*. 2024. Vol. 3192, № 1. Article 020065. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0241671

9. Bendikiene R., Ciuplys A., Kavaliauskiene L. Circular economy practice: from industrial metal waste to production of high wear resistant coatings. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 229. P. 1225–1232. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.068

10. Wang B., Guo Y., Zhang Z., Yi X., Wang D. Investigation of cryogenic friction and wear properties of Invar 36 alloy against Si3N4 ceramic balls. *Wear*. 2023. Vol. 518. Article 204648. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204648

11. Song C., Hu S., Han Q., Han X., Xie L., Zhuang W., Hua L. Ultrastrong gradient nanostructured CSS-42L bearing steel and its enhanced wear resistance at elevated temperature. *Surface and Coatings Technology*. 2023. Vol. 470. Article 129881. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129881

12. Muigai M. N., Akinlabi E. T., Mwema F. M. Influence of direct current (DC) on hardness of weld stainless steel coating–A model for mild steel repair. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 44. P. 1133–1135. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.230

13. Ye H., Chen A., Liu S., Zhang C., Gao Y., Li Q., Guo H. Effect of ultrasonic surface rolling process on the surface properties of QAl10-3-1.5 aluminum bronze alloy. *Surface and Coatings Technology*. 2022. Vol. 433. Article 128126. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128126

14. Huang P., Wang Y., Lin J., Cheng Y., Liu F., Qiu Q. Effect of ultrasonic rolling on surface integrity, machining accuracy, and tribological performance of bearing steels under different process schemes. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2023. Vol. 43. P. 143–157. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.03.003

15. Yin F., Wang Y., Ji H., Ma Z., Nie S. Impact of Sliding Speed on the Tribological Behaviors of Cermet and Steel Balls Sliding Against SiC Lubricated with Seawater. *Tribology Letters*. 2021. Vol. 69. Article 39. DOI: https://doi.org/10.1007/s11249-021-01413-1

16. Рибалко І М., Тіхонов О В., Захаров А В., Гончаренко О О. Модифікування реноваційних покриттів для підвищення зносостійкості культиваторних лап. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2022. № 4(83). С. 37–42. DOI: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.4.4

17. Тіхонов О В., Рибалко І М., Гончаренко О О., Івченко Р. Розробка технології відновлення хвостової частини корпусу різця дорожньої фрези. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. 2024. № 103. С. 64–70. DOI: https://doi.org/10.32347/gbdmm.2024.103.0401

References

1. Atynian, A., Bratishko, S., Butnik, S., Zhyhlo, A., & Buhaevskyi, V. (2024). Use of carbon composites in repair of overpasses and bridges. *Věda a perspektivy*, 8(39), 213–225. https://doi.org/10.52058/2695-1592-2024-8(39)-213-225

2. Korostin, O. O. (2025). Pidkhody do zmenshennia vuhletsevoho slidu v trenuvanni velykykh ML-modelei [Approaches to reducing the carbon footprint in training large ML models]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Seriia: Tekhnichni nauky*, (1), 40–51. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.1.5 (date of access: 08.03.2025) [in Ukrainian].

3. Pavlovskyi, M. (2024). The improvement of fuel efficiency and environmental characteristics of diesel engine by using biodiesel fuels. In S. Boichenko, A. Zaporozhets, A. Yakovlieva, & I. Shkilniuk (Eds.), *Modern technologies in energy and transport* (Studies in Systems, Decision and Control; Vol. 510). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_4

4. Li, X., Zhai, C., He, W., Lu, Y., & Zhang, B. (2023). Experimental investigation of tool wear and machining quality of BTA deep-hole drilling in low-carbon alloy steel SA-5083. *Materials, 16*(20), Article 6686. https://doi.org/10.3390/ma16206686

5. Kostyk, K., Kuric, I., Saga, M., Kostyk, V., Ivanov, V., Kovalov, V., & Pavlenko, I. (2022). Impact of magnetic-pulse and chemical-thermal treatment on alloyed steels' surface layer. *Applied Sciences, 12*(1), Article 469. https://doi.org/10.3390/app12010469

6. Gao, L., Xu, C., Ge, X., Hu, Q., Wang, X., Meng, Y., & Liu, B. (2024). Study on microstructure and properties between alloy steel and powder steel via hot isostatic pressing diffusion bonding. *Materials Today Communications, 41*, Article 110390. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.110390

7. Huang, J., Xu, J., Wu, X., Wang, C., Jin, C., Ji, X., & Han, T. (2025). Effects of different forging ratios on microstructure, mechanical properties and friction and wear behaviour of Q355D steel. *Canadian Metallurgical Quarterly, 64*(3), 927–942. https://doi.org/10.1080/00084433.2024.2398933

8. Selvam, L., Ganapathy, V., Arumugam, P., Ramarathinam, R. P., Ramdas, P. V., Palanivel, A., & Rajendran, V. (2024). A study of oxidation behaviour of hard-faced surface on steel using SMAW. *AIP Conference Proceedings, 3192*(1), Article 020065. https://doi.org/10.1063/5.0241671

9. Bendikiene, R., Ciuplys, A., & Kavaliauskiene, L. (2019). Circular economy practice: From industrial metal waste to production of high wear resistant coatings. *Journal of Cleaner Production, 229*, 1225–1232. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.068

10. Wang, B., Guo, Y., Zhang, Z., Yi, X., & Wang, D. (2023). Investigation of cryogenic friction and wear properties of Invar 36 alloy against Si3N4 ceramic balls. *Wear, 518*, Article 204648. https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204648

11. Song, C., Hu, S., Han, Q., Han, X., Xie, L., Zhuang, W., & Hua, L. (2023). Ultrastrong gradient nanostructured CSS-42L bearing steel and its enhanced wear resistance at elevated temperature. *Surface and Coatings Technology, 470*, Article 129881. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129881

12. Muigai, M. N., Akinlabi, E. T., & Mwema, F. M. (2021). Influence of direct current (DC) on hardness of weld stainless steel coating – A model for mild steel repair. *Materials Today: Proceedings, 44*, 1133–1135. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.230

13. Ye, H., Chen, A., Liu, S., Zhang, C., Gao, Y., Li, Q., & Guo, H. (2022). Effect of ultrasonic surface rolling process on the surface properties of QAl10-3-1.5 aluminum bronze alloy. *Surface and Coatings Technology, 433*, Article 128126. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128126

14. Huang, P., Wang, Y., Lin, J., Cheng, Y., Liu, F., & Qiu, Q. (2023). Effect of ultrasonic rolling on surface integrity, machining accuracy, and tribological performance of bearing steels under different process schemes. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 43*, 143–157. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.03.003

15. Yin, F., Wang, Y., Ji, H., Ma, Z., & Nie, S. (2021). Impact of sliding speed on the tribological behaviors of cermet and steel balls sliding against SiC lubricated with seawater. *Tribology Letters, 69*, Article 39. https://doi.org/10.1007/s11249-021-01413-1

16. Rybalko, I. M., Tikhonov, O. V., Zakharov, A. V., & Honcharenko, O. O. (2022). Modyfikuvannia renovatsiinykh pokryttiv dlia pidvyshchennia znosostiikosti kultyvatornykh lap [Modification of renovation coatings to increase the wear resistance of cultivator shares]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Bulletin of Kherson National Technical University*, 4(83), 37–42. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.4.4 [in Ukrainian].

17. Tikhonov, O. V., Rybalko, I. M., Honcharenko, O. O., & Ivchenko, R. (2024). Rozrobka tekhnolohii vidnovlennia khvostovoi chastyny korpusu rittsia dorozhnoi frezy [Development of a technology for restoring the tail section of a road milling cutter body]. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny – Mining, Construction, Road and Reclamation Machines*, (103), 64–70. https://doi.org/10.32347/gbdmm.2024.103.0401 [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 30.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 656 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.29

О. М. РОЇК
кандидат фармацевтичних наук, доцент,
доцент кафедри промислової фармації
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0002-5988-6577

О. В. ІЩЕНКО
доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри промислової фармації
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0002-9510-6005

Г. І. КУЗЬМІНА
кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри промислової фармації
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0002-0691-8563

А. В. ВЛАДІ
здобувач вищої освіти
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0009-0001-8610-6775

РОЗРОБКА СКЛАДУ ГІДРОГЕЛЕВИХ ПАТЧІВ З ЕКСТРАКТОМ КОМБУЧІ ДЛЯ ДОГЛЯДУ ЗА ШКІРОЮ ПІД ОЧИМА

У даній роботі наведено результати ґрунтовного аналізу науково-літературних джерел, що підтверджують актуальність розробки гідрогелевих патчів для догляду за шкірою під очима, а також представлено створену експериментальну формулу патчів із додаванням екстракту комбучі. При розробці враховано використання різних полімерних основ і біоактивних речовин з метою досягнення оптимальних органолептичних та фізико-хімічних характеристик готового продукту. Особливу увагу приділено підбору компонентів, які забезпечують максимальне зволоження, живлення та відновлення чутливої ділянки шкіри, а також їхньому синергетичному впливу.

Гелеві патчі під очі – це сучасний і популярний косметичний засіб, призначений для локальної доставки активних компонентів безпосередньо до тонкої шкіри періорбітальної зони. Ця ділянка є особливо вразливою до впливу зовнішніх факторів та вікових змін, що проявляється у вигляді сухості, зморшок, набряків, темних кіл та пігментації. Метою даного дослідження стало створення гідрогелевих патчів, здатних забезпечувати інтенсивне зволоження, зменшення ознак втоми та старіння шкіри, покращення її еластичності та загального зовнішнього вигляду, а також надання охолоджувального та заспокійливого ефекту.

Розроблена формула була протестована за низкою фізико-хімічних показників, а також визначали стабільність та термін придатності продукції, який склав 6 місяців. Отримані результати підтверджують перспективність використання екстракту комбучі як природного джерела біоактивних сполук з антиоксидантними та тонізуючими властивостями. Проведене дослідження підкреслює необхідність комплексного підходу на етапах створення косметичних засобів, зокрема ретельного підбору полімерних основ, оптимізації концентрацій активних інгредієнтів і вивчення їхньої сумісності.

Отримані результати свідчать про високу ефективність поєднання полімерної матриці та природних активних компонентів, що забезпечує пролонговане вивільнення біоактивних речовин. Подальші дослідження планується спрямувати на вдосконалення технології виробництва патчів, оптимізацію процесу їх виготовлення та масштабування для промислового застосування.

Ключові слова: *гідрогелеві патчі, косметична продукція, стандартизація, контроль якості, шкіра, старіння, зморшки.*

© Роїк О. М., Іщенко О. В., Кузьміна Г. І., Владі А. В., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

O. M. ROIK
PhD in Pharmacy, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Industrial Pharmacy
Kyiv National University of Technology and Design
ORCID: 0000-0002-5988-6577

O. V. ISHCHENKO
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Industrial Pharmacy
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0002-9510-6005

G. I. KUZMINA
Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Industrial Pharmacy
Kyiv National University of Technology and Design
ORCID: 0000-0002-0691-8563

A. V. VLADI
Applicant for Higher Education
Kyiv National University of Technology and Design
ORCID: 0009-0001-8610-6775

DEVELOPMENT OF THE COMPOSITION OF HYDROGEL PATCHES WITH KOMBUCHA EXTRACT FOR SKIN CARE UNDER THE EYES

This paper presents the results of a thorough analysis of scientific and literary sources, confirming the relevance of the development of hydrogel patches for skin care under the eyes, and also presents the created experimental formula of patches with the addition of kombucha extract. The development took into account the use of various polymer bases and bioactive substances in order to achieve optimal organoleptic and physicochemical characteristics of the finished product. Particular attention was paid to the selection of components that provide maximum hydration, nutrition and restoration of the sensitive skin area, as well as their synergistic effect. Gel eye patches are a modern and popular cosmetic product designed for local delivery of active components directly to the thin skin of the periorbital zone. This area is particularly vulnerable to the influence of external factors and age-related changes, which manifests itself in the form of dryness, wrinkles, swelling, dark circles and pigmentation. The aim of this research was to create hydrogel patches capable of providing intensive hydration, reducing signs of fatigue and skin aging, improving its elasticity and overall appearance, as well as providing a cooling and soothing effect.

The developed formula was tested for a number of physicochemical parameters, and the stability and shelf life of the product, which was 6 months, were also determined. The results obtained confirm the prospects of using kombucha extract as a natural source of bioactive compounds with antioxidant and tonic properties. The study emphasizes the need for an integrated approach at the stages of creating cosmetic products, in particular, careful selection of polymer bases, optimization of concentrations of active ingredients and study of their compatibility. The results obtained indicate the high efficiency of the combination of a polymer matrix and natural active components, which ensures prolonged release of bioactive substances. Further research is planned to be directed at improving the technology of patch production, optimizing the process of their manufacture and scaling for industrial application.

Key words: *hydrogel patches, cosmetic products, standardization, quality control, skin, aging, wrinkles.*

Постановка проблеми

Постійний вплив зовнішніх факторів спричиняє зміни у структурі та функціонуванні шкірного покриву. Зона навколо очей характеризується зниженою кількістю сальних залоз, що обумовлює її підвищену схильність до сухості. Внаслідок меншої товщини дерми ця ділянка є більш вразливою до дії агресивних чинників навколишнього середовища, що сприяє ранній появі зморшок та інших ознак старіння [1].

Періорбітальна зона є особливо вразливою до дерматологічних змін, серед яких найпоширенішими є гіперпігментація, дрібні зморшки, вікові лінії та набряки. Гідрогелеві патчі під очі демонструють високу ефективність у корекції зазначених проявів завдяки спрямованому зволоженню та доставці активних компонентів [2].

Ці засоби забезпечують інтенсивне живлення та гідратацію, а завдяки біосумісності гідрогелевих матриць сприяють делікатному омолодженню однієї з найчутливіших ділянок шкіри без ризику подразнення.

Пошук ефективних та безпечних рішень для вирішення проблем шкіри під очима вже давно є предметом уваги у косметичній сфері. Від набряків та темних кіл до дрібних зморшок – ніжна шкіра під очима часто страждає від стресу, втоми та старіння [1].

Гідрогелеві патчі стали перспективним рішенням для цілеспрямованого полегшення та омолодження. У сфері інновацій у догляді за шкірою гідрогелеві формули стали універсальними засобами для доставки активних інгредієнтів для вирішення конкретних проблем шкіри. Завдяки своїм багатим на воду, зшитим полімерним мережам, гідрогелі мають унікальні властивості, що роблять їх добре придатними для застосування в різних сферах, від загоєння ран до косметичного покращення [3]. Серед різноманітних застосувань, патчі під очі на основі гідрогелю привернули значну увагу завдяки своєму потенціалу для ефективного та зручного вирішення безлічі проблем шкіри під очима.

Традиційні підходи до догляду за шкірою, хоча й певною мірою ефективні, можуть бути недостатніми для забезпечення цілеспрямованого полегшення цієї чутливої та складної області.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Шкіра – це орган, який постійно піддається впливу багатьох зовнішніх факторів, що можуть впливати на її структуру та функції. У шкірі навколо очей менше сальних залоз, що робить її більш схильною до сухості. Крім того, шкіра навколо очей значно тонша, що робить її надзвичайно чутливою та вразливою до зморшок та інших симптомів старіння.

З віком здатність шкіри до регенерації знижується, що особливо помітно в тонкій періорбітальній зоні (під очима), схильній до старіння. Це призводить до появи зморшок, що є значною косметичною проблемою, яка посилюється через вплив УФ-променів, забруднення навколишнього середовища, куріння (що руйнує колаген та еластин) та дієти з високим вмістом цукру. Попри значний попит на методи корекції, дослідження причин та ефективних підходів до лікування цих станів залишаються недостатніми [4].

Вікове старіння періорбітальної зони є багатошаровим процесом, що характеризується стабільністю об'єму верхнього орбітального жиру на тлі значного збільшення нижнього, а також розширенням об'єму орбітальної порожнини внаслідок кісткової резорбції [4].

Окрім зморшок, поширеними естетичними вадами є інфраорбітальні темні кола та набряки під очима. Темні кола, хоча й не загрожують здоров'ю, істотно впливають на якість життя та емоційний стан, посилюючись від втоми та недосипання. Набряки ж виникають через тонкість шкіри повік, що дозволяє просвічувати кровоносним судинам, і можуть бути спричинені затримкою рідини, алергіями, гормональними змінами та браком сну.

Враховуючи чутливість та анатомічні особливості періорбітальної зони, для усунення втоми, набряків та зморшок були розроблені спеціальні засоби, зокрема, патчі для шкіри під очима. Ці засоби діють як мініатюрні маски, що створюють ущільнювальний бар'єр, який трохи підвищує температуру шкіри та покращує поглинання активних компонентів. Вони також допомагають утримувати вологу, що особливо корисно для тонкої шкіри в цій області.

Косметичні патчі з'явилися відносно недавно як засіб догляду за шкірою, що став можливим завдяки стрімкому прогресу у технологіях доставки активних компонентів, зволоження та забезпечення надійного прилягання до шкіри.

Патчі користуються високим попитом завдяки своїй універсальності застосування, охоплюючи такі сфери, як косметологія, дерматологія та доставка лікарських засобів [5, 6].

Окрім цього, принциповим є включення до складу патчів активних інгредієнтів, здатних чинити позитивний вплив на стан шкіри, зокрема проявляти антиоксидантну та протизапальну активність [5, 6].

Гідрогелеві патчі є перспективним засобом локальної доставки біоактивних компонентів, здатних зволожувати шкіру, зменшувати зморшки, пігментацію та набряклість, а також покращувати її еластичність та зовнішній вигляд. Як показали дослідження Naina Bhargava та співавт., гідрогелі на основі алое вера, меду, сандалового дерева, яєчного жовтка та гліцерину виявили високу стабільність, безпечність і позитивний вплив на стан шкіри, причому найвищу ефективність продемонстрували патчі з алое вера [5].

Гідрогелеві патчі, завдяки високому вмісту води та гідрофільній матриці, забезпечують ефективне зволоження, доставку активних інгредієнтів і покращення мікроциркуляції у періорбітальній зоні. Як зазначають Khedkar та Aher (2022), поєднання вітамінів, антиоксидантів, зволожувачів і рослинних екстрактів у складі патчів сприяє зменшенню темних кіл, зморшок, набряклості та проявів фотостаріння, що робить їх перспективним напрямом у сучасній космецевтиці [6].

Біодеградовані косметичні патчі на основі композиту полі (молочної кислоти) з фікоціанін-альгінатом демонструють потенціал для поєднання екологічності та ефективної доставки активних інгредієнтів до шкіри. Як показали Adli та співавт. (2020), така комбінація забезпечує задовільні механічні властивості, контрольоване вивільнення та біосумісність, що робить матеріал перспективним для косметичних і дерматологічних застосувань [7].

Оскільки основна функція патчів полягає у транспортуванні активних сполук, вони мають бути оснащені адгезивним матеріалом та відповідними властивостями, що забезпечують їхню ефективну дію протягом бажаного періоду часу.

На сучасному етапі активно розвиваються дослідницькі напрямки, присвячені оптимізації методів вивільнення активних компонентів або фармакологічних засобів, що має на меті підвищити їхню ефективність для кінцевого споживача. Зазвичай структурна основа патчів формується з полімерної матриці, в яку інкорпоруються цільові активні інгредієнти [6, 7, 8].

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка складу гідрогелевих патчів з екстрактом комбучі для догляду за шкірою під очима та встановлення їх фізико-хімічних показників якості

Викладення основного матеріалу дослідження

На підставі виконаного аналізу публікацій у науково-практичних виданнях було розроблено рецептуру гідрогелевих патчів навколо очей, склад яких сформовано відповідно до Міжнародної номенклатури косметичних інгредієнтів (INCI) [9]. До її складу увійшли такі компоненти: Aqua purificata, Xanthan Gum (Cosphaderm X34), Amorphophallus Konjac Root Extract (Cosphaderm KG), Gellan Gum (Гелева камедь), Carrageenan/Chondrus Crispus (Carrageenan) Extract (Satiagel), Potassium Chloride (калій хлорид), Glycerin (гліцерин), Phenoxyethanol, Ethylhexylglycerin (Saliguard), Mica, CI 77891, CI 77491, CI 77510 (Перламутр зелений). В якості активного компоненту для гідрогелевих патчів під очі використовували екстракт комбучі (Saccharomyces/xylinum/black tea ferment). Цей біоферментований інгредієнт цінується за його потужні антиоксидантні властивості, які допомагають захистити шкіру від окислювального стресу та пошкоджень. Крім того, екстракт має антиглікаційну дію, що сприяє збереженню еластичності шкіри, запобігаючи руйнуванню колагену та еластину, і таким чином зменшуючи видимість тонких ліній і зморшок [10, 11].

Використані в роботі активні та допоміжні речовини не належать до «Списку речовин, заборонених для використання в косметичній продукції», який наведено у Додатку 2 до Технічного регламенту на косметичну продукцію.

Під час опрацювання рецептури гідрогелевих патчів із сироваткою з екстрактом комбучі встановлювали органолептичні та фізико-хімічні показники якості. Проведення лабораторних досліджень перед серійним виводом косметичної продукції на ринок залишається актуальною задачею сучасної косметичної галузі. Це зумовлено необхідністю забезпечення якості, безпечності та ефективності нових формул, що відповідають вимогам нормативної документації та очікуванням споживачів.

Найважливішою характеристикою одразу після приготування гідрогелю є його здатність до виливання, що полегшує розлив до форми та забезпечує плівки з рівномірною поверхнею.

Якість отриманих зразків гідрогелевих патчів із сироваткою оцінювали за зовнішнім виглядом, однорідністю і їх здатністю фіксуватися на шкірі. Зовнішній вигляд і колір гідрогелевих патчів із сироваткою визначали переглядом проби, поміщеної на предметне скло або аркуш білого паперу. Однорідність – відсутність грудок, крупинок – визначають візуально і на дотик. Запах визначають органолептично і порівнювали із контрольним еталонним зразком. pH визначали потенціометричним методом відповідно до ДСТУ 2207.1-93 «Засоби миючі синтетичні і речовини поверхнево-активні. Методи визначення концентрації водневих іонів у водному розчині» із масовою часткою засобу 10 %. Значення pH-середовища визначали в сироватці з екстрактом комбучі для гідрогелевих патчів при температурі 20–22 °С 21 потенціометричним методом на pH-метрі Temp Milwaukee MW102 (0.01pH). В'язкість синтезованого гідрогелю вимірювали віскозиметром ВЗ-246. Сутність методу полягає у вимірюванні часу витікання готового напівфабрикату з наповненої до країв чаші через сопло. Одразу після приготування було відібрано приблизно 50,0 г гідрогелю за температури 79–80 °С, який заливали у чашу віскозиметра і вимірювали час за який напівфабрикат витік. Визначено, що час витікання гідрогелю в залежності від температури становив від 4 до 7 секунд.

Після застигання спостерігали за показниками міцності, адгезії, та характером поверхні плівок, а також за тактильними відчуттями після контакту зі шкірою.

Для визначення стабільності та прогнозування терміну придатності використано метод «прискореного старіння» ASTL (Accelerated Shelf Life Testing), що означає прискорену зміну показників якості продукції в екстремальних умовах зберігання - при підвищеній температурі. Реалізація методу полягає у прискоренні процесу досліджень щодо змін обраних показників якості від температурних факторів псування за короткий період часу. Даний метод дозволяє прогнозувати поведінку продукту протягом довгого часу без необхідності реального зберігання протягом всього терміну зберігання, що допомагає оцінити його ефективність і надійність.

Визначення фізико-хімічних показників гідрогелевих патчів із сироваткою з екстрактом комбучі.

Фізико-хімічні показники якості косметичних засобів є ключовими для визначення їхніх властивостей і відповідності стандартам. Технічний регламент на косметичну продукцію, що набув чинності у 2024 році, покладає обов'язок на виробників використовувати перевірену сировину та проводити оцінку безпечності, щоб гарантувати, що кінцевий продукт є максимально безпечним для споживача.

Результати фізико-хімічних досліджень гідрогелевих патчів з екстрактом комбучі представлено в табл. 1.

За фізико-хімічними показниками якості продукція відповідає вимогам нормативного документа (НД).

Визначення стабільності гідрогелевих патчів методом прискореного старіння.

Метод «прискореного старіння» використовується для швидкого визначення терміну придатності та стабільності продукту, коли даних про його довготривале зберігання ще немає. Цей метод імітує природні процеси старіння, піддаючи зразки впливу підвищеної температури та контрольованої вологості протягом певного періоду

Таблиця 1

Фізико-хімічні показники гідрогелевих патчів із сироваткою з екстрактом комбучі

Назва показника	Норма	Результат аналізу
Зовнішній вигляд	Зелені гідрогелеві патчі із сироваткою	Відповідає
Колір	Зелений	Відповідає
Запах	Має легкий трав'яний запах за рахунок використаної сировини	Відповідає
Водневий показник (pH) сироватки	4,5–5,5	5,03
Водневий показник (pH) 10 % розчину гідрогелю	4,5–5,5	5,18

Таблиця 2

Результати дослідження зразка № 1 в термошафі при температурі +40 °С

№	Назва показника / норма	Період зберігання (тижні)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Зовнішній вигляд / Однорідна система, без сторонніх включень	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	С	С
2	Колір / Відповідає затвердженому зразку	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	В	В
3	Запах / Відповідає затвердженому зразку	А	А	А	А	А	А	А	А	А	С	В	С
4	Цілісність тари	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А
5	Втрати по вазі початкова вага брутто	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А

Таблиця 3

Результати дослідження зразка № 2 при температурі +4 °С в холодильній камері

№	Назва показника / норма	Період зберігання (тижні)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Зовнішній вигляд / Однорідна система, без сторонніх включень	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А
2	Колір / Відповідає затвердженому зразку	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А
3	Запах / Відповідає затвердженому зразку	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А
4	Цілісність тари	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А
5	Втрати по вазі початкова вага брутто	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А	А

часу. Для проведення лабораторного дослідження на стабільність косметичного засобу після відкриття було взято 3 синтезовані зразки гідрогелевих патчів із сироваткою. Кожний зразок попередньо зважували на вагах Ваги ТВЕ-0,21-0,001-а-2, класу точності – II (високий) і результат зважування вказували як початкову (номінальну) вагу продукту.

Тестування першого зразка проводився в тарі при температурі +40 °С протягом 12-ти тижнів (3 місяців). Результати внесені до таблиці 2, з відповідним значенням де *A* = відсутність змін, *B* = незначна зміна (важко помітна), *C* = середня зміна, *D* = значна зміна (очевидна).

Тестування другого зразка проводився в тарі при температурі +4 °С протягом 12-ти тижнів (3 місяців). Результати внесені до таблиці 3, з відповідним значенням, де *A* = відсутність змін, *B* = незначна зміна (важко помітна), *C* = середня зміна, *D* = значна зміна (очевидна).

Тестування третього зразка проводилось циклічно, загальна кількість циклів становила п'ять. Кожен цикл включав три етапи: 24 години витримування при температурі +40 °С у термошафарі, 24 години за нормальних умов при температурі 22–24 °С, а також 24 години зберігання при температурі +4 °С у холодильній камері. Після завершення кожного циклу здійснювався контрольний огляд зразка. Результати спостережень занесені до таблиці 4, де оцінка змін здійснювалась за чотирибальною шкалою: *A* – відсутність змін, *B* – незначна, важко помітна зміна, *C* – середня зміна, *D* – значна, очевидна зміна.

За результатами трьох дослідів проведених зі зразками гідрогелевих патчів із сироваткою було відмічено, що під дією високих температур відбувається втрата по вазі продукту та візуально знижуються початкові показники якості продукції. За всіма досліджуваними показниками кращим був зразок із досліду 2, який тестували в холодильній камері.

Гідрогелеві патчі зазвичай упаковуються в герметичні упаковки, щоб запобігти їх висиханню та забрудненню. Після відкриття упаковки, вологість та стабільність продукту можуть знижуватись, що зменшує їхній термін придатності. Для визначення, чи зберігаються патчі безпечно протягом 6 місяців після відкриття, важливо, щоб упаковка була закрита герметично та не піддавалася впливу повітря та вологи. Зберігання патчів у правильних умовах є важливим для збереження їхніх властивостей. Ідеальні умови – це зберігання в сухому, прохолодному місці, далеко від прямих сонячних променів та високих температур. Якщо патчі зберігаються при підвищеній

Таблиця 4

Результати дослідження зразка № 3, що проводилися циклічно

№	Назва показника / норма	Період зберігання (цикли)				
		1	2	3	4	5
1	Зовнішній вигляд / Однорідна система, без сторонніх включень	A	A	A	A	B
2	Колір / Відповідає затвердженому зразку	A	A	A	A	A
3	Запах / Відповідає затвердженому зразку	A	A	A	A	B
4	Цілісність тари	A	A	A	A	A
5	Втрати по вазі початкова вага брутто	A	A	A	B	C
6	Текстура	A	A	A	B	C

температурі або в умовах, що сприяють високій вологості, це може значно скоротити термін їх використання після відкриття.

Після відкриття упаковки, гідрогелеві патчі можуть змінювати свої фізичні властивості, такі як колір, запах, текстура та вологість. Якщо після кількох місяців після відкриття патчі змінюють ці характеристики (наприклад, висихають, втрачають еластичність, набувають неприємного запаху або зміни кольору), це може свідчити про те, що їх термін використання закінчився або вони більше не ефективні.

Період 6 місяців після відкриття гідрогелевих патчів зазвичай залежить від умов зберігання, упаковки, а також наявності активних компонентів. Якщо зберігати патчі в герметичній упаковці при правильних умовах (прохолодне, сухе місце, захист від світла), вони можуть зберігатися протягом цього періоду. Рекомендується також проводити регулярні перевірки на зміни в їх стані для забезпечення безпечного використання.

Дослідження показали, що структура гідрогелевої матриці залишається стабільною протягом певного часу, за умови дотримання рекомендованих умов. Було підтверджено здатність гідрогелю утримувати вологу, що є ключовим параметром для збереження ефективності патчів. Вміст води залишався стабільним в перші тижні після відкриття.

При впливі підвищеної температури та вологості спостерігалося поступове висихання патчів, втрата адгезійних властивостей після 4–6 тижнів моделювання (еквівалентно кільком місяцям у реальних умовах).

На підставі даного лабораторного дослідження обґрунтовано термін придатності гідрогелевих патчів із сироваткою з екстрактом комбучі – 6 місяців після відкриття.

Висновки

Грунтуючись на комплексному аналізі науково-літературних джерел, було розроблено рецептуру гідрогелевих патчів з екстрактом комбучі для догляду за шкірою під очима.

В рамках дослідження було визначено органолептичні та фізико-хімічні показники якості розроблених патчів. За результатами аналізу, всі показники відповідають нормативним вимогам: pH сироватки становить 5,03, а pH 10 % розчину гідрогелю – 5,18, що знаходиться в межах норми 4,5–5,5.

Для прогнозування терміну придатності було застосовано метод «прискореного старіння» (ASTL). На основі отриманих даних було встановлено, що підвищені температури призводять до втрати ваги та зниження початкових показників якості продукції. Найкращі результати стабільності продемонстрував зразок, що зберігався в холодильнику.

Дослідження підтвердили, що гідрогелева матриця здатна утримувати вологу, що є ключовою для ефективності патчів. Однак, після 4–6 тижнів моделювання (що еквівалентно кільком місяцям у реальних умовах) під впливом підвищеної температури та вологості, спостерігалося висихання патчів і втрата адгезійних властивостей. За умови зберігання в герметичній упаковці в прохолодному, сухому місці, гідрогелеві патчі з сироваткою з екстрактом комбучі можуть зберігати свої властивості до 6 місяців після відкриття.

Список використаної літератури

1. Kołodziejczak A, Rotsztejn H. The eye area as the most difficult area of activity for esthetic treatment. *J Dermatolog Treat*. 2022; 33(3):1257-1264. doi:10.1080/09546634.2020.1832189

2. Byeon, S. Y., Cho, M. K., Shim, K. H., Kim, H. J., Song, H. G., Shin, H. S. (2017). Development of a Spirulina extract/alginate-imbedded PCL nanofibrous cosmetic patch. Journal of Microbiology and Biotechnology, 27(9), 1657–1663.

3. Роїк, О., Субота, Є., Шумейко, М. (2025). Інноваційні гідрогелеві композиції для лікування опікових ран із протизапальними властивостями: огляд літератури. Сучасна медицина, фармація та психологічне здоров'я, (1(19), 46–55. https://doi.org/10.32689/2663-0672-2025-1-8

4. Lohakitsatian P, Tunlayadechanont P, Tantitham T. Decoding Periorbital Aging: A Multilayered Analysis of Anatomical Changes. Aesthetic Plast Surg. 2025;49(3):664-671. doi:10.1007/s00266-024-04590-1

5. Naina Bhargava*, Rachana Akhand Giri, Harshvardhan Dangi, Revitalising Under-Eye Hydrogel Patchs: Development and Assessment, Int. J. of Pharm. Sci., 2024, том 2, випуск 8, 2487-2493. https://doi.org/10.5281/zenodo.13176042

6. Khedkar, S. V., & Aher, R. (2022). Cosmetic Hydrogel Under Eye Patch: Review. International Journal for Research Trends and Innovation, 7(8), 1621. https://doi.org/10.5281/zenodo.13176042

7. Adli SA, Ali F, Azmi AS, et al. Development of Biodegradable Cosmetic Patch Using a Polylactic Acid/Phycocyanin-Alginate Composite. Polymers (Basel). 2020;12(8):1669. Published 2020 Jul 27. doi:10.3390/polym12081669

8. Kołodziejczak, A., & Rotsztejn, H. (2020). The eye area as the most difficult area of activity for esthetic treatment. Journal of Dermatological Treatment, 33(3), 1257–1264. https://doi.org/10.1080/09546634.2020.1832189

9. Міжнародна номенклатура косметичних інгредієнтів (INCI). URL: https://ec.europa.eu/growth/sectors/cosmetics/cosing_en

10. Jakubczyk K, Kałduńska J, Kochman J, Janda K. Chemical Profile and Antioxidant Activity of the Kombucha Beverage Derived from White, Green, Black and Red Tea. Antioxidants. 2020; 9(5):447. https://doi.org/10.3390/antiox9050447

11. Greenwalt CJ, Steinkraus KH, Ledford RA. Kombucha, the fermented tea: microbiology, composition, and claimed health effects. J Food Prot. 2000;63(7):976-981. doi:10.4315/0362-028x-63.7.976

References

1. Kołodziejczak, A., & Rotsztejn, H. (2022). The eye area as the most difficult area of activity for esthetic treatment. *J Dermatolog Treat*, *33*(3), 1257–1264. doi:10.1080/09546634.2020.1832189

2. Byeon, S. Y., Cho, M. K., Shim, K. H., Kim, H. J., Song, H. G., Shin, H. S. (2017). Development of a Spirulina extract/alginate-imbedded PCL nanofibrous cosmetic patch. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, *27*(9), 1657–1663.

3. Roik, O., Subota, E., Shumeiko, M. (2025). Innovative hydrogel compositions for the treatment of burn wounds with anti-inflammatory properties: a literature review. Modern medicine, pharmacy and psychological health, (1(19), 46–55. https://doi.org/10.32689/2663-0672-2025-1-8

4. Lohakitsatian, P., Tunlayadechanont, P., & Tantitham, T. (2025). Decoding Periorbital Aging: A Multilayered Analysis of Anatomical Changes. *Aesthetic Plast Surg*, *49*(3), 664–671. doi:10.1007/s00266-024-04590-1

5. Bhargava, N., Giri, R. A., & Dangi, H. (2024). Revitalising Under-Eye Hydrogel Patchs: Development and Assessment. *Int. J. of Pharm. Sci*., *2*(8), 2487–2493. https://doi.org/10.5281/zenodo.13176042

6. Khedkar, S. V., & Aher, R. (2022). Cosmetic Hydrogel Under Eye Patch: Review. *International Journal for Research Trends and Innovation*, *7*(8), 1621. https://doi.org/10.5281/zenodo.13176042

7. Adli, S. A., Ali, F., Azmi, A. S., et al. (2020). Development of Biodegradable Cosmetic Patch Using a Polylactic Acid/Phycocyanin-Alginate Composite. *Polymers (Basel)*, *12*(8), 1669. Published 2020 Jul 27. doi:10.3390/polym12081669

8. Kołodziejczak, A., & Rotsztejn, H. (2020). The eye area as the most difficult area of activity for esthetic treatment. *Journal of Dermatological Treatment*, *33*(3), 1257–1264. https://doi.org/10.1080/09546634.2020.1832189

9. International nomenclature of cosmetic ingredients (INCI). URL: https://ec.europa.eu/growth/sectors/cosmetics/cosing_en

10. Jakubczyk, K., Kałduńska, J., Kochman, J., & Janda, K. (2020). Chemical Profile and Antioxidant Activity of the Kombucha Beverage Derived from White, Green, Black and Red Tea. *Antioxidants*, *9*(5), 447. https://doi.org/10.3390/antiox9050447

11. Greenwalt, C. J., Steinkraus, K. H., & Ledford, R. A. (2000). Kombucha, the fermented tea: microbiology, composition, and claimed health effects. *J Food Prot*, *63*(7), 976–981. doi:10.4315/0362-028x-63.7.976

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 24.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 656.6-042.5/.8:502/504 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.30

О. І. РОССОМАХА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри навігації і керування судном,
доцент кафедри суднобудування і судноремонту
імені професора Ю. Л. Воробйова
Навчально-науковий інститут морського флоту
Одеського національного морського університету
ORCID: 0000-0002-4425-2192

Л. В. ПІЗІНЦАЛІ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри суднобудування і судноремонту
імені професора Ю. Л. Воробйова
Навчально-науковий морський інженерно-технічний інститут
Одеського національного морського університету
ORCID: 0000-0002-8046-0917

Г. Г. ТОМЧАКОВСЬКИЙ
старший викладач кафедри навігації і керування судном
Навчально-науковий інститут морського флоту
Одеського національного морського університету
ORCID: 0000-0002-9799-4368

О. А. РОССОМАХА
доцент, начальник навчально-методичного відділу,
доцент кафедри суднових енергетичних систем і комплексів
Навчально-науковий інститут морського флоту
Одеського національного морського університету
ORCID: 0000-0002-0230-9453

Н. І. АЛЕКСАНДРОВСЬКА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри суднобудування і судноремонту
імені професора Ю. Л. Воробйова,
доцент кафедри суднових енергетичних систем і комплексів
Навчально-науковий морський інженерно-технічний інститут
Одеського національного морського університету
ORCID: 0000-0001-6591-2068

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ СУДЕН ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ: СУЧАСНІ ПРАКТИКИ, МІЖНАРОДНІ ТА НАЦІОНАЛЬНІ ВИКЛИКИ

В статті проведено комплексний аналіз існуючих стратегій та технологій зниження викидів у судноплавстві, зокрема в контексті внутрішнього судноплавства України. Дослідження охоплює широкий спектр питань від міжнародних ініціатив до національних особливостей впровадження енергоефективних рішень.

Розглянута проблема оцінки енергоефективності внутрішнього судноплавства в Україні, проаналізовано стратегії ІМО та реалії внутрішніх водних шляхів. Особлива увага приділяється дорожній карті Центральної комісії з судноплавства на Рейні зі зменшення викидів, яка пропонує багатоетапний підхід до скорочення шкідливих речовин у повітрі. Підкреслюється важливість вдосконалення технологій енергоефективності суден, впровадження нових видів палива та зміни управлінських стратегій у галузі.

Детально аналізуються технічні рішення, включаючи використання емульгованого палива, що поєднує воду та важке суднове паливо і забезпечує більш чисте згоряння, знижуючи викиди NO_x *до 30 %. Досліджуються перспективи біодизельних сумішей, зокрема суміш B20, яка зменшує викиди* CO *на 19 % і* CH *на 25 %. Розглядається оптимізація швидкості та співвідношення палива як ефективний спосіб мінімізації вуглецевого сліду через математичне моделювання оптимальних параметрів маршруту та потужності двигуна.*

© Россомаха О. І., Пізінцалі Л. В., Томчаковський Г. Г., Россомаха О. А., Александровська Н. І., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Особливе місце відведено аналізу індексів енергоефективності, таких як EEDI та EEOI, які є ключовими інструментами оцінки та контролю викидів CO_2. EEDI розраховується на основі конструктивних характеристик судна та стимулює впровадження енергоефективних технологій у проектуванні, тоді як EEOI надає інформацію про реальну ефективність судна під час експлуатації.

Значну увагу приділено ролі міжнародних платформ співпраці, таких як PLATINA 3, Waterborne Technology Platform (WTP), European Maritime Safety Agency (EMSA), The Clean Shipping Coalition (CSC), які об'єднують державні, приватні та науково-дослідні організації для створення екологічно стійкого середовища розвитку судноплавства.

Інноваційним є аналіз впливу адитивних технологій, зокрема 3D-друку, на енергоефективність суден. Розглядаються можливості використання 3D-друку для виготовлення компонентів від невеликих деталей до великих елементів, включаючи гребні гвинти та секції корпусів. Особлива увага приділяється проблемам шорсткості поверхні та точності розмірів, що впливають на механічні властивості та експлуатаційні характеристики деталей.

Аналізуються українські наукові розробки у сфері енергоефективності судноплавства, включаючи нові підходи до формування індексу енергоефективності для великотоннажних караванів на Дунаї та практичні результати судноплавних компаній.

Результати аналізу можуть бути корисними для вчених та фахівців у галузі внутрішнього судноплавства для розробки ефективних стратегій та політик з питань зменшення викидів парникових газів та поліпшення енергоефективності суден, а також для інтеграції України у міжнародну екологічну політику судноплавства.

Ключові слова: *стратегії ІМО, шкідливі викиди, енергоефективність, внутрішнє плавання, паливна ефективність, 3-D друкування.*

O. I. ROSSOMAKHA
PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Navigation and Control of the Ship,
Associate Professor at the Department of Shipbuilding and Ship Repair
named after Prof. Yu. L. Vorobyov
Merchant Marine Institute
of Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0002-4425-2192

L. V. PIZINTSALI
Ph.D., Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Shipbuilding and Ship Repair
named after Prof. Yu. L. Vorobyov
Educational and Scientific Marine Engineering and Technical Institute
of Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0002-8046-0917

G. G. TOMCHAKOVSKY
Senior Lecturer at the Department of Navigation and Control of the Ship
Merchant Marine Institute
of Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0002-9799-4368

O. A. ROSSOMAKHA
Associate Professor, Head of the Educational and Methodological Department,
Associate Professor at the Department of Ship Power Systems and Complexes
Merchant Marine Institute
of Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0002-0230-9453

N. I. ALEKSANDROVSKA
PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Shipbuilding and Ship Repair
named after Prof. Yu. L. Vorobyov,
Associate Professor at the Department of Ship Power Systems and Complexes
Educational and Scientific Marine Engineering and Technical Institute
of Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0001-6591-2068

ENERGY EFFICIENCY OF SHIPS AS A TOOL FOR REDUCING EMISSIONS: CURRENT PRACTICES, INTERNATIONAL AND NATIONAL CHALLENGES

The article provides a comprehensive analysis of existing strategies and technologies for reducing emissions in shipping, in particular in the context of Ukrainian domestic shipping. The study covers a wide range of issues from international initiatives to national peculiarities of energy efficiency solutions implementation.

The problem of assessing the energy efficiency of inland navigation in Ukraine is considered, IMO strategies and the realities of inland waterways are analyzed. Particular attention is paid to the Central Commission for Navigation on the Rhine's roadmap for reducing emissions, which offers a multi-stage approach to reducing harmful substances in the air. The importance of improving ship energy efficiency technologies, introducing new fuels and changing management strategies in the industry is emphasized.

Technical solutions are analyzed in detail, including the use of emulsified fuel, which combines water and heavy marine fuel and provides cleaner combustion, reducing NO_x *emissions by up to 30 %. The prospects of biodiesel blends are being investigated, in particular the B20 blend, which reduces* CO *emissions by 19 % and* CH *emissions by 25 %. Optimization of speed and fuel ratio is considered as an effective way to minimize the carbon footprint through mathematical modeling of optimal route parameters and engine power.*

A special place is given to the analysis of energy efficiency indices, such as EEDI and EEOI, which are key tools for assessing and controlling CO_2 *emissions. The EEDI is calculated based on the ship's design characteristics and stimulates the introduction of energy-efficient technologies in design, while the EEOI provides information on the actual efficiency of the ship during operation.*

Considerable attention is paid to the role of international cooperation platforms, such as PLATINA 3, Waterborne Technology Platform (WTP), European Maritime Safety Agency (EMSA), The Clean Shipping Coalition (CSC), which bring together public, private and research organizations to create an environmentally sustainable shipping environment.

An innovative approach is to analyze the impact of additive technologies, in particular 3D printing, on the energy efficiency of ships. The possibilities of using 3D printing to manufacture components ranging from small parts to large elements, including propellers and hull sections, are considered. Particular attention is paid to the problems of surface roughness and dimensional accuracy, which affect the mechanical properties and performance of parts.

Ukrainian scientific developments in the field of energy efficiency of shipping are analyzed, including new approaches to the formation of an energy efficiency index for large caravans on the Danube and practical results of shipping companies.

The results of the analysis can be useful for scientists and experts in the field of inland navigation to develop effective strategies and policies to reduce greenhouse gas emissions and improve energy efficiency of ships, as well as to integrate Ukraine into international environmental shipping policy.

Key words: *IMO strategies, harmful emissions, energy efficiency, inland navigation, fuel efficiency, 3-D printing.*

Вступ

Сучасний стан судноплавства є важливим елементом світової економіки, однак він також створює значні екологічні проблеми. За оцінками Міжнародної морської організації (ІМО), судноплавство є відповідальним за близько 2–3 % глобальних викидів парникових газів, що сприяють зміні клімату та забрудненню навколишнього середовища. У зв'язку з цим, досягнення цілей декарбонізації та зниження шкідливих викидів є необхідним для збереження екологічної рівноваги та сталого розвитку судноплавного сектору. Одним із ключових шляхів досягнення цих цілей є вдосконалення технологій енергоефективності суден, впровадження нових видів палива та зміна управлінських стратегій у галузі. У цьому контексті важливою складовою є також скорочення викидів у внутрішньому судноплавстві, яке займає значну частину глобального транспортного ринку.

Значну роль у зменшенні негативного впливу судноплавства на навколишнє середовище можуть відігравати новітні технології, вдосконалені нормативно-правові акти та міжнародні ініціативи. Одним із таких інструментів є програми скорочення викидів CO_2 та інших забруднювальних речовин, а також розвиток альтернативних видів палива і технологій, орієнтованих на зниження енергоспоживання. Ці питання стали пріоритетними для багатьох країн і міжнародних організацій, зокрема для ЄС, ІМО та інших.

Таким чином, дослідження проблеми зниження викидів у судноплавстві є надзвичайно важливим як для світової практики, так і для національного рівня. Воно сприяє формуванню ефективних рішень, що забезпечать інтеграцію України у міжнародну екологічну політику судноплавства.

Постановка проблеми

Сучасне судноплавство є однією з найбільших складових глобальної транспортної системи, але водночас воно є значним джерелом викидів парникових газів та інших забруднювачів, що негативно впливають на навколишнє середовище. З огляду на глобальне прагнення до скорочення викидів CO_2 та інших шкідливих речовин, зростає актуальність розробки та впровадження ефективних стратегій для зниження екологічного сліду судноплавства.

Проблема декарбонізації морського та внутрішнього судноплавства має ключове значення не тільки на міжнародному рівні, але й для України, яка має значний потенціал розвитку внутрішньої судноплавної мережі. Зокрема, впровадження інноваційних технологій, таких як використання біопалива та альтернативних джерел енергії,

а також оптимізація технічних характеристик суден, є необхідним кроком для досягнення цілей сталого розвитку та зменшення викидів у судноплавному секторі.

Це дослідження є актуальним у контексті глобальних ініціатив, таких як Стратегія декарбонізації ІМО, а також є важливим для розвитку українських інфраструктурних проектів у галузі судноплавства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У науковій літературі останніх років простежується стійкий інтерес до проблеми підвищення енергоефективності судноплавства та зниження викидів.

У роботах [1, 3, 5, 8] висвітлено підходи до оцінювання ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден, що безпосередньо впливають на витрати палива та надійність експлуатації

У свою чергу, у роботах [2, 4, 9, 12], що вдосконалення методів навігації є одним із дієвих інструментів підвищення енергоефективності суден

Значний внесок у дослідження зроблено у [10, 13], де проаналізовано вплив альтернативних палив на вартість життєвого циклу судна. Автори показали, що використання біопалив та їх сумішей може суттєво знизити викиди CO_2 при збереженні економічної доцільності

Окрему увагу приділено впливу шорсткості гребного гвинта на витрати суднового палива. Дослідження [11], підтвердили, що навіть незначне збільшення шорсткості веде до зростання опору і, відповідно, витрат палива

У [9, 12, 14] зосереджено увагу на зв'язку між енергоефективністю та безпекою експлуатації суден. Автори доводять, що оптимізація енергетичних показників прямо впливає на зниження аварійності та підвищення загальної надійності судноплавства

Таким чином, останні публікації висвітлюють комплексність проблеми енергоефективності: від технічних рішень та альтернативних палив до впливу конструктивних особливостей і безпеки експлуатації. Це формує наукове підґрунтя для інтегрованих підходів до зниження викидів у судноплавстві.

Формулювання мети дослідження

Метою цього дослідження є аналіз існуючих стратегій та технологій зниження викидів у судноплавстві, зокрема в контексті внутрішнього судноплавства України. Завданням є вивчення ефективності альтернативних видів палива, інноваційних технологій та методів оцінки енергоефективності для зниження викидів CO_2. Доведення необхідності розробки рекомендацій щодо впровадження міжнародних стандартів та політик у практику українського судноплавства для досягнення сталого розвитку галузі.

Викладення основного матеріалу дослідження

У контексті посилення глобальних екологічних викликів, скорочення викидів у судноплавстві стає стратегічним пріоритетом для більшості морських держав. Одним із найважливіших документів, що окреслює шлях до декарбонізації, є дорожня карта Центральної комісії з судноплавства на Рейні (ЦКСР) зі зменшення викидів внутрішнього судноплавства [1]. Вона пропонує багатоетапний підхід до зменшення шкідливих речовин у повітрі, що є критично важливим у Європі.

Серед технічних рішень особливу увагу привертає використання емульгованого палива, що поєднує воду та важке суднове паливо [2]. Дослідження свідчать, що така суміш забезпечує більш чисте згоряння та може знизити викиди NO_x до 30 %.

Разом з тим, за даними останніх аналітичних оглядів, ІМО наразі не виконує власну стратегію щодо декарбонізації, оскільки регуляторні рамки залишаються фрагментарними [3]. Це підкреслює потребу у впровадженні нових, більш жорстких норм на глобальному рівні.

Серед альтернативних джерел енергії активно досліджується використання біодизельних сумішей. Наприклад, експериментальні тести показали, що суміш B20 (20 % біодизеля, 80 % дизеля) зменшує викиди CO на 19 % і CH на 25 % [4].

Оптимізація швидкості та співвідношення палива – ще один перспективний напрям досліджень. Зокрема, математичне моделювання дозволяє визначити оптимальні параметри маршруту та потужності двигуна для мінімізації вуглецевого сліду [5].

Згідно з Четвертим дослідженням ІМО щодо викидів парникових газів, судноплавство у 2018 році відповідало за 2,89 % глобальних викидів CO_2 [6]. Це вимагає системного підходу до зменшення впливу галузі на зміну клімату.

Українські науковці активно долучаються до вирішення проблеми підвищення енергоефективності в судноплавстві. Активно аналізуються сучасні методики вимірювання споживання палива та викидів CO_2, а також вплив енергоефективних технологій на судноплавні системи. Особлива увага приділяється використанню альтернативних палив та оптимізації швидкості як способів зниження споживання палива та викидів. Науковці [7, 8] пропонують новий підхід до формування індексу енергоефективності, який враховує специфіку внутрішнього судноплавства, зокрема використання великотоннажних караванів на Дунаї. Цей підхід дозволяє комплексно оцінювати енергоефективність суден, враховуючи реальні умови експлуатації.

Крім того, фахівці Одеського національного морського університету досліджують вплив енергоефективності на безпеку експлуатації суден. У їхніх роботах аналізуються основні параметри енергоефективності [9, 10] та їх

взаємозв'язок з безпекою плавання [11], що підкреслює важливість комплексного підходу до впровадження енергоефективних заходів у судноплавстві [12–14].

Практичні результати також досягаються на рівні судноплавних компаній. Наприклад, ПрАТ «Українське дунайське пароплавство» впровадило нові норми витрат палива для портових буксирів. Після проведених випробувань було виявлено, що фактичні витрати палива значно нижчі за встановлені норми, що дозволяє компанії значно економити ресурси та знижувати екологічний вплив. [15]

Суттєвим інструментом контролю енергоспоживання є індекс енергоефективності проєктування суден (*EEDI*) [16]. Його суть полягає у розрахунку питомих викидів CO_2 на тонно-милю вантажу [17].

EEDI обчислюється на основі конструктивних характеристик судна, включаючи його розміри, тип двигуна та інші параметри, що впливають на споживання палива. Використання *EEDI* стимулює впровадження енергоефективних технологій та інновацій у проектуванні суден, таких як оптимізація форми корпусу, використання альтернативних джерел енергії та вдосконалення систем управління. Також, *EEDI* є частиною глобальної стратегії ІМО щодо скорочення викидів парникових газів у морському транспорті, що сприяє сталому розвитку галузі та охороні навколишнього середовища.

Розрахунок *EEDI* ґрунтується на припущеннях щодо питомого споживання палива двигунами (у г/кВт-год) порівняно з потужністю, встановленою на судні. Повна формула *EEDI* (детально описана в MEPC.1/Circ.681) включає кілька поправок і коефіцієнтів, пристосованих до конкретних класів суден і різних конфігурацій та умов експлуатації.

Для нових суден *EEDI* є мірою «проектної» ефективності судна, але він не дає жодних вказівок щодо його експлуатаційної ефективності. У зв'язку з цим два судна-близнюки з однаковим значенням *EEDI* можуть мати різні викиди залежно від коефіцієнта завантаження, морських умов і способу експлуатації судна. *EEDI* є статичним показником, якщо тільки судно не зазнає значного переобладнання [17].

$$EEDI = \frac{Power\ installed \cdot Specific\ fuel\ consumption \cdot Carbon\ conversion}{Available\ capacity \cdot Speed}$$

Керівництво щодо розрахунку досягнутого *EEDI* (2018) [18] та оновлене керівництво *EEDI* 2022 року [19] містять більш точні методи оцінки відповідності суден екологічним стандартам.

Окрему увагу варто приділити індексам енергоефективності для обчислення вуглецевого сліду у внутрішньому судноплавстві. Такі індекси, зокрема *EEOI* (*Energy Efficiency Operational Indicator*), вже застосовуються на практиці [20].

EEOI – показник, який надає інформацію про ефективність роботи судна під час експлуатації. Розрахунок базується на споживанні палива окремим судном і даних про виконану транспортну роботу (наприклад, маса вантажу, кількість перевезених пасажирів тощо), в результаті чого отримують показник викидів CO_2 на тонну морської милі. Повне рівняння *EEOI* міститься в циркулярному листі MEPC.1/Circ.684 і може бути узагальнене, як показано нижче.

$$EEOI = \frac{Fuel\ consumption \cdot Carbon\ conversion}{Distance\ sailed \cdot Cargo\ transported}$$

На відміну від *EEDI*, *EEOI* не обмежується новими суднами і може використовуватися для вимірювання «реальної» ефективності судна, що експлуатується, а також для оцінки впливу будь-яких змін, таких як очищення корпусу і гвинтів, повільне пропарювання, поліпшення планування рейсу тощо. *EEOI* можна покращити, збільшивши кількість перевезеного вантажу або застосувавши будь-який захід, спрямований на зменшення споживання палива (наприклад, повільне випаровування, модифікація судна, планування маршрутів з урахуванням погодних умов і т.ін.). Однак, оскільки розрахунок *EEOI* залежить від діяльності судна, він буде змінюватися, можливо, значно, з часом і між рейсами. Тому він не може бути використаний для встановлення фіксованої цифри – наприклад, «мітки», що відображає поточні показники судна. [17]

Важливе значення для сталого розвитку та зниження викидів в межах судноплавства мають платформи співпраці, такі як PLATINA 3, Waterborne Technology Platform (WTP), European Maritime Safety Agency (EMSA), The Clean Shipping Coalition (CSC) та ін.

Ці платформи, об'єднують державні, приватні та науково-дослідні організації, щоб створити екологічно стійке і технологічно інноваційне середовище для розвитку судноплавства. Вони допомагають розробляти політики, втілювати новітні технології і створювати стратегії для зменшення впливу транспорту на навколишнє середовище.

PLATINA 3 – це ініціатива в межах Європейського Союзу, спрямована на поліпшення транспортної інфраструктури та зменшення викидів у галузі судноплавства. Вона є частиною програми, що орієнтується на досягнення

стійкої та ефективної транспортної системи через інтеграцію інноваційних рішень у сфері логістики та інфраструктури [21].

Waterborne Technology Platform (WTP) [22] – ця платформа об'єднує ключових учасників морської та річкової індустрії з метою розвитку інноваційних технологій для зменшення впливу судноплавства на навколишнє середовище.

EMSA [23] є основною агенцією ЄС, що займається безпекою та охороною навколишнього середовища в морському та річковому судноплавстві. Вона забезпечує впровадження європейських стандартів безпеки та охорони навколишнього середовища для суден, які працюють в європейських водах.

CSC [24] – це міжнародна платформа, яка об'єднує організації, що працюють над зменшенням викидів від судноплавства, зокрема парникових газів.

Суднобудівна галузь прагне до підвищення енергоефективності та зниження витрат за рахунок впровадження адитивних технологій. Однак широке застосування 3D-друку обмежується проблемами шорсткості поверхні та точності розмірів, що впливає на механічні властивості та експлуатаційні характеристики деталей.

Використання 3D-друку на борту морських суден може суттєво змінити парадигму технічного обслуговування систем безпеки, підвищуючи оперативність, автономність і адаптивність морських операцій, енергоефективність суден.

У суднобудівній галузі спостерігається зростаюче впровадження 3D-друку для будівництва, ремонту і технічного обслуговування суден. Ключові переваги цієї технології включають зниження витрат, прискорення виробництва, гнучкість проектування і доступність деталей на вимогу, і як наслідок – підвищення енергоефективності судна. Незважаючи на значний потенціал, існують такі проблеми, як стандартизація, сертифікація, обмеження матеріалів і потреба в кваліфікованому персоналі. Проте, зростаюче число успішних впроваджень і багатообіцяюче майбутнє вказують на те, що ця технологія відіграватиме дедалі важливішу роль у підвищенні енергоефективності судна та, взагалі, стійкості морської галузі.

Сучасна морська галузь характеризується такими тенденціями, як зростаюча автоматизація, необхідність ефективного технічного обслуговування та важливість сталого розвитку. У цьому контексті 3D-друк є проривною технологією, здатною задовольнити ці зростаючі потреби. Хоча спочатку увага була зосереджена на використанні 3D-друку для технічного обслуговування засобів індивідуального захисту на суднах але сьогодні, сфери застосування значно розширені, охоплюючи ширший спектр можливостей у суднобудуванні та ремонті.

Суднобудування – одна з багатьох галузей, у якій технології тривимірного друку використовуються дедалі частіше: ми вже бачили найрізноманітніші рішення, починаючи з сертифікованого гребного гвинта (рис. 1), що друкується на 3D-принтері, до регулювання питань використання високих технологій та інтелектуальної власності в морському судноплавстві.

3D-друк використовується для виготовлення широкого спектру компонентів, від невеликих складних деталей (таких як клапани та насоси), до великих елементів (таких як гребні гвинти і секції корпусів).

Суднобудівники можуть створювати нестандартні деталі складної геометрії, які важко чи неможливо виготовити традиційними методами. Наприклад, успішно надруковано та встановлено великий клапанний колектор на авіаносці (HII Newport News Shipbuilding (США), рис. 2.



Рис. 1. Перший у світі гребний гвинт, надрукований на 3D-принтері з нікель-алюміній-бронзового сплаву за допомогою дугового зварювання

Джерело: [25]



Рис. 2. Клапанний колектор американського авіаносця

Джерело: [26]

Відомо, що шорсткість поверхні корпусу судна та гребного гвинта суттєво впливають на енергоефективність судна. Шорсткість поверхні визначається параметрами R_a, R_z, R_{max}, вимірюваними за допомогою профілометрів і 3D-сканерів.

Найпоширеніші методи оцінювання:

– Контактні методи: механічні профілометри, що дають змогу вимірювати нерівності з високою точністю.
– Безконтактні методи: лазерні та оптичні сканери, інтерферометрія.
– Методи комп'ютерного аналізу: 3D-сканування і порівняння з CAD-моделлю.

Для оцінки точності розмірів застосовуються координатно-вимірювальні машини і цифрові вимірювальні системи.

Зарубіжні дослідження показують, що:

– зниження висоти шару до 50 мкм зменшує Ra на 30–50 %;
– багатопроменева лазерна обробка (в DMLS) знижує пористість на 20–40 %;
– контроль температурного режиму зменшує внутрішні напруги.

Найефективнішими методами зарубіжні дослідження визнають лазерну постобробку й електрохімічне полірування, оскільки вони дають змогу зменшити шорсткість до Ra < 1 мкм без значних змін геометрії.

Досвід провідних компаній показує:

– **GE Additive** (США): застосування лазерного полірування в авіації та суднобудуванні знизило шорсткість деталей до Ra = 0.4 мкм.

– **Siemens** (Німеччина): впровадження комбінованої постобробки (лазерна + електрохімічна) дало змогу досягти точності ±0.05 мм.

– **Rolls-Royce** (Великобританія): використання SLM і гальванопокриття збільшило термін служби деталей на 30 %.

Міжнародні стандарти, так як ISO 25178 [27] та комітети (наприклад, Комітет F42 з технологій адитивного виробництва, ASTM F42) [28] регламентують допуски за шорсткістю і точністю. Сучасні зарубіжні дослідження прагнуть до зниження шорсткості до Ra < 1 мкм і відхилень розмірів менше 0.1 мм.

Отже, на шорсткість і точність деталей впливає вибір технології, параметри друку і тип матеріалу, а параметри шорсткості – на енергоефективність.

У світлі глобальних екологічних викликів, скорочення викидів у судноплавстві стає важливим стратегічним пріоритетом для більшості морських держав. Для України, яка має значний потенціал у галузі внутрішнього та річкового судноплавства, критично важливо розробити рекомендації для впровадження міжнародних стандартів, щоб досягти сталого розвитку галузі. Це забезпечить не лише зменшення екологічного впливу, а й покращення конкурентоспроможності українських судноплавних компаній на міжнародному ринку. Українські судноплавні компанії повинні адаптуватися до цих стандартів для підтримки конкурентоспроможності та забезпечення ефективного інтегрування в міжнародну систему.

Впровадження інноваційних технологій, таких як емульговане паливо, біодизельні суміші, оптимізація швидкості і енергоефективні технології є критичним для скорочення викидів CO_2, NO_x та інших шкідливих речовин. Розробка рекомендацій, що інтегрують ці технології в національну практику, дозволить не лише знизити викиди,

а й зменшити залежність від традиційних енергоресурсів. А співпраця з міжнародними платформами допоможе Україні долучитися до глобальних ініціатив щодо сталого розвитку судноплавства. Такі платформи створюють умови для обміну досвідом, розробки інноваційних рішень та ефективного впровадження новітніх технологій.

Результати дослідження. Розробка рекомендацій для впровадження міжнародних стандартів та політик у практику українського судноплавства є необхідною для досягнення сталого розвитку галузі. Вони повинні включати адаптацію до глобальних екологічних вимог, використання інноваційних технологій, інтеграцію енергоефективних індексів та розвиток альтернативних джерел енергії. Це дозволить не лише зменшити екологічний вплив, а й підвищити ефективність роботи судноплавних компаній, зробивши їх більш конкурентоспроможними на міжнародному рівні.

Висновки

У результаті проведеного аналізу існуючих стратегій та технологій скорочення викидів у судноплавстві можна зробити декілька важливих висновків.

1. Для ефективного зменшення викидів парникових газів у судноплавстві важливо застосовувати комплексні стратегії, що включають технічні інновації, зміни у нормативно-правовій базі та широке впровадження альтернативних джерел енергії.

2. Технології використання емульгованого палива та біодизельних сумішей демонструють обнадійливі результати у зниженні викидів NO_x та CO_2 [2, 4]. Продовження досліджень та впровадження таких інноваційних рішень може суттєво зменшити екологічний слід судноплавного сектору.

3. Суперечності в існуючих регуляціях IMO [3], відсутність єдиного механізму декарбонізації свідчать про те, що необхідно посилювати глобальні зусилля для досягнення сталого розвитку морської галузі. Інноваційні ініціативи та розробки, як, наприклад, нові методи розрахунку *EEDI*, можуть стати основою для подальших кроків у цьому напрямку.

4. Використання індексів енергоефективності, таких як *EEDI* та *EEOI*, допомагає не лише оцінювати ефективність існуючих суден, але й визначати потенціал для поліпшення їх роботи. Це дозволяє знизити викиди CO_2 та зробити судноплавство більш ефективним і стійким.

5. Наукові дослідження та міжурядова співпраця з міжнародними платформами, є важливими інструментами для поширення передового досвіду і впровадження інновацій у галузі. Така співпраця може допомогти країнам швидше адаптуватися до змінних умов та досягти поставлених екологічних цілей. Ініціативи PLATINA 3, WTP, EMSA, CSC, Green Marine сприяють обміну досвідом, впровадженню стандартів та інновацій у галузі.

6. Україна має значний потенціал для покращення енергоефективності внутрішнього судноплавства. Наукові та технічні дослідження, впровадження нових норм витрат палива, а також розробка індексів енергоефективності – створюють основу для екологізації українського судноплавства.

Автори вважають, що для досягнення реального скорочення викидів в судноплавстві необхідно об’єднати зусилля урядів, міжнародних організацій, науковців та індустрії. Лише комплексний підхід дозволить не лише покращити екологічний стан, а й забезпечити економічну сталість галузі у майбутньому.

Список використаної літератури

1. Central Commission for the Navigation of the Rhine (CCNR). CCNR Roadmap for reducing inland navigation emissions [Електронний ресурс]. Strasbourg Cedex: CCNR, 2022. 75 p. URL: https://www.ccr-zkr.org/files/documents/Roadmap/Roadmap_en.pdf (дата звернення: 04.08.2025).

2. Lee T., Cho J., Lee J. Mixing properties of emulsified fuel oil from mixing marine bunker-c fuel oil and water [Електронний ресурс]. Journal of Marine Science and Engineering. 2022. Vol. 10, No. 11. P. 1610. DOI: https://doi.org/10.3390/jmse10111610

3. Bach H., Hansen T. IMO off course for decarbonization of shipping? Three challenges for stricter policy [Електронний ресурс]. Marine Policy. 2023. Vol. 147. P. 105379. DOI: https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105379

4. Zhang Y., Liu Y., Wang J., Li C. Effects of different biodiesel-diesel blend fuel on combustion and emission characteristics of a diesel engine [Електронний ресурс]. Processes. 2021. Vol. 9, No. 11. P. 1984. DOI: https://doi.org/10.3390/pr9111984

5. Shih Y-C., Chang S.-L., Huang Y.-H., Lin C.-T. Speed and fuel ratio optimization for a dual-fuel ship to minimize its carbon emissions and cost [Електронний ресурс]. Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11, No. 4. P. 758. DOI: https://doi.org/10.3390/jmse11040758

6. Faber J. та ін. Fourth IMO GHG Study. MEPC 75/7/15 [Електронний ресурс]. London: International Maritime Organization, 2020. 524 p. URL: https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/07/Fourth-IMO-GHG-Study-2020-Full-report-and-annexes_compressed.pdf

7. Suvorov P. S., Tarasenko T. V., Zalozh V. I. Restrictive factors in the evaluation of the inland pushers’ energy efficiency with heavy convoys [Електронний ресурс]. Automation of Ship Technical Facilities. 2020. Vol. 26, No. 1. P. 94–109. DOI: https://doi.org/10.31653/1819-3293-2020-1-26-94-109

8. Суворов П. С., Тарасенко Т. В., Залож В. І. Деякі питання оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому судноплавстві. Двигуни внутрішнього згоряння. Розділ Загальні проблеми двигунобудування. 2023. № 2. URL: http://dvs.khpi.edu.ua/article/view/287480

9. Головань А. І. Особливості оцінювання ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. Системи управління, навігації та зв'язку. 2024. Т. 1, № 75. DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.005

10. Kalinichenko Y., Tomchakovsky G., Oberto Santana L. Increasing energy efficiency by improving navigation methods. Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions. 2024. P. 11–14. DOI: https://doi.org/10.21303/2585-6847.2024.003567 (дата звернення: 24.05.2025).

11. Пізінцалі Л. В., Россомаха О. І., Шумило О. М., Александровська Н. І., Россомаха О.А. Аналіз впливу альтернативних видів палива на вартість життєвого циклу судна. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. 2023. № 1(490). С. 11–19. URL: http://znp.nuos.mk.ua/archives/2023/1/3.pdf

12. Александровська Н. І., Пізінцалі Л. В., Россомаха О. І., Россомаха О. А. Аналіз впливу шорсткості гребного гвинта на витрати суднового палива. Збірник наукових праць НУК ім. адмірала Макарова. 2023. № 4(493). С. 3–12. DOI: https://doi.org/10.15589/znp2023.4(493).1

13. Мельник О. М. Оцінка впливу енергоефективності на безпеку експлуатації судна. Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. 2023. № 2(39). DOI: https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-2.11

14. Россомаха О. І., Александровська Н. І., Пізінцалі Л. В., Россомаха О. А., Рабоча Т. В. Використання діаграми Ісікави при аналізі впливу шорсткості корпусу судна на витрати суднового палива. Наука і техніка сьогодні. Серія «Техніка». 2024. № 1(29). С. 763–785. DOI: https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-1(29)-763-785

15. Українське Дунайське пароплавство зменшило норму витрат палива для п… [Електронний ресурс]. URL: https://ukrport.org.ua/%D1%83%D0%B4%D0%BF-%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%88%D0%B8%D0%BB%D0%BE-%D0%BD%D0%BE%D1%80%D0%BC%D1%83-%D0%B2%D0%B8%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82-%D0%BF/

16. Indian Register of Shipping. Implementing Energy Efficiency Design Index (EEDI) [Електронний ресурс]. Mumbai, 2022. 13 p. URL: https://www.irclass.org/media/2368/energy-efficiency-design-index.pdf

17. Transport & Environment. Energy Efficiency of Ships: what are we talking about? [Електронний ресурс]. URL: https://www.transportenvironment.org/articles/energy-efficiency-ships-what-are-we-talking-about

18. IMO. 2018 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships: Resolution MEPC.308(73) [Електронний ресурс]. URL: https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308(73).pdf

19. IMO. 2022 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships: Resolution MEPC.364(79) [Електронний ресурс]. URL: https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364(79).pdf

20. Pauli G., Ley J. Energy Efficiency Indices for carbon foot printing and as instrument for CO_2-emission reduction of inland vessels [Електронний ресурс]. Berlin: Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure, 2022. 31 p. URL: https://platina3.eu/download/gernot-paulii-and-jens-ley-on-energy-efficiency-indices-as-an-instrument-for-the-reduction-of-co2-emissions-of-inland-vessels/?ind=0

21. PLATINA 3. Platform for the implementation of a future inland navigation action programme [Електронний ресурс]. URL: https://platina3.eu/download/5th-stage-all-presentations-and-agenda/

22. Waterborne Technology Platform [Електронний ресурс]. URL: https://www.waterborne.eu/

23. European Maritime Safety Agency (EMSA) [Електронний ресурс]. URL: https://www.emsa.europa.eu/

24. Clean Shipping Coalition [Електронний ресурс]. URL: https://cleanshipping.org/

25. Naval Group. 3D-printed propeller: the world's first with class approval [Електронний ресурс]. Paris, 2017. URL: https://www.3dnatives.com/de/ramlab-051220175/

26. HII Newport News Shipbuilding. 3D printing of a valve manifold for USS Enterprise [Електронний ресурс]. 2018. URL: https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/3d-objekte/newport-news-shipbuilding-setzt-auf-3d-druck-271153043/

27. INTERNATIONAL STANDARD ISO 25178-2. iTeh Standards [Електронний ресурс]. URL: https://cdn.standards.iteh.ai/samples/46065/020e133c24d648119d70b0e3f3239233/ISO-25178-1-2016.pdf

28. ASTM F42 Committee on Additive Manufacturing Technologies. Standards for Additive Manufacturing [Електронний ресурс]. ASTM International, 2020. URL: https://www.astm.org/

References

1. Central Commission for the Navigation of the Rhine (CCNR). (2022). *CCNR Roadmap for reducing inland navigation emissions* (75 p.). Strasbourg Cedex: CCNR. Retrieved August 4, 2025, from https://www.ccr-zkr.org/files/documents/Roadmap/Roadmap_en.pdf

2. Lee, T., Cho, J., & Lee, J. (2022). Mixing properties of emulsified fuel oil from mixing marine bunker-c fuel oil and water. *Journal of Marine Science and Engineering, 10*(11), 1610. https://doi.org/10.3390/jmse10111610

3. Bach, H., & Hansen, T. (2023). IMO off course for decarbonization of shipping? Three challenges for stricter policy. *Marine Policy, 147*, 105379. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105379

4. Zhang, Y., Liu, Y., Wang, J., & Li, C. (2021). Effects of different biodiesel-diesel blend fuel on combustion and emission characteristics of a diesel engine. *Processes, 9*(11), 1984. https://doi.org/10.3390/pr9111984

5. Shih, Y.-C., Chang, S.-L., Huang, Y.-H., & Lin, C.-T. (2023). Speed and fuel ratio optimization for a dual-fuel ship to minimize its carbon emissions and cost. *Journal of Marine Science and Engineering, 11*(4), 758. https://doi.org/10.3390/jmse11040758

6. Faber, J., et al. (2020). *Fourth IMO GHG Study* (524 p.). London: International Maritime Organization. Retrieved May 22, 2025, from https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/07/Fourth-IMO-GHG-Study-2020-Full-report-and-annexes_compressed.pdf

7. Suvorov, P. S., Tarasenko, T. V., & Zalozh, V. I. (2020). Restrictive factors in the evaluation of the inland pushers' energy efficiency with heavy convoys. *Automation of Ship Technical Facilities, 26*(1), 94–109. https://doi.org/10.31653/1819-3293-2020-1-26-94-109 [in Ukrainian].

8. Suvorov, P. S., Tarasenko, T. V., & Zalozh, V. I. (2023). Deiaki pytannia otsinky enerhoefektyvnosti suden v umovakh enerhetychnoho perekhodu u vnutrishnomu sudnoplavstvi [Some issues of assessing ship energy efficiency in the context of energy transition in inland navigation]. *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia. Zahalni problemy dvyhunobuduvannia, 2*. Retrieved May 24, 2025, from http://dvs.khpi.edu.ua/article/view/287480 [in Ukrainian].

9. Holovan, A. I. (2024). Osoblyvosti otsiniuvannia efektyvnosti system tekhnichnoho obsluhovuvannia vantazhnykh suden [Features of evaluating the efficiency of maintenance systems for cargo vessels]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zv'iazku, 1*(75). https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.005 [in Ukrainian].

10. Kalinichenko, Y., Tomchakovsky, G., & Oberto Santana, L. (2024). Increasing energy efficiency by improving navigation methods. *Technology Transfer: Fundamental Principles and Innovative Technical Solutions*, 11–14. https://doi.org/10.21303/2585-6847.2024.003567 [in Ukrainian].

11. Pizintsali, L. V., Rossomakha, O. I., Shumylo, O. M., Aleksandrovska, N. I., & Rossomakha, O. A. (2023). Analiz vplyvu alternatyvnykh vydiv palyva na vartist zhyttievoho tsyklu sudna [Analysis of the impact of alternative fuels on the ship lifecycle cost]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK im. admirala Makarova, 1*(490), 11–19. Retrieved May 24, 2025, from http://znp.nuos.mk.ua/archives/2023/1/3.pdf [in Ukrainian].

12. Aleksandrovska, N. I., Pizintsali, L. V., Rossomakha, O. I., & Rossomakha, O. A. (2023). Analiz vplyvu shorstkosti hrebnoho hvynta na vytraty sudnovoho palyva [Analysis of propeller roughness impact on ship fuel consumption]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK im. admirala Makarova, 4*(493), 3–12. https://doi.org/10.15589/znp2023.4(493).1 [in Ukrainian].

13. Melnyk, O. M. (2023). Otsinka vplyvu enerhoefektyvnosti na bezpeku ekspluatatsii sudna [Assessment of energy efficiency impact on ship operation safety]. *Podilskyi visnyk: silske hospodarstvo, tekhnika, ekonomika, 2*(39). https://doi.org/10.37406/2706-9052-2023-2.11 [in Ukrainian].

14. Rossomakha, O. I., Aleksandrovska, N. I., Pizintsali, L. V., Rossomakha, O. A., & Rabocha, T. V. (2024). Vykorystannia diahramy Isikavy pry analizi vplyvu shorstkosti korpusu sudna na vytraty sudnovoho palyva [Using Ishikawa diagram for analyzing hull roughness effect on ship fuel consumption]. *Nauka i tekhnika sohodni. Seriia "Tekhnika", 1*(29), 763–785. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-1(29)-763-785 [in Ukrainian].

15. Ukrainske Dunaiske paroplavstvo. (2025, August 24). UDP zmenshylo normu vytrat palyva dlia p... [Ukrainian Danube Shipping Company reduced the fuel consumption rate for …]. Retrieved August 24, 2025, from https://ukrport.org.ua/%D1%83%D0%B4%D0%BF-%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%88%D0%B8%D0%BB%D0%BE-%D0%BD%D0%BE%D1%80%D0%BC%D1%83-%D0%B2%D0%B8%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%82-%D0%BF

16. Indian Register of Shipping. (2022). *Implementing Energy Efficiency Design Index (EEDI)* (13 p.). Mumbai. Retrieved August 16, 2025, from https://www.irclass.org/media/2368/energy-efficiency-design-index.pdf

17. Transport & Environment. (2025, August 24). Energy Efficiency of Ships: what are we talking about? Retrieved August 24, 2025, from https://www.transportenvironment.org/articles/energy-efficiency-ships-what-are-we-talking-about

18. International Maritime Organization (IMO). (2018). *2018 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships: Resolution MEPC.308(73)*. Retrieved May 2, 2025, from https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308(73).pdf

19. International Maritime Organization (IMO). (2022). *2022 Guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships: Resolution MEPC.364(79)*. Retrieved May 2, 2025, from https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.364(79).pdf

20. Pauli, G., & Ley, J. (2022). *Energy Efficiency Indices for carbon foot printing and as instrument for* CO_2*-emission reduction of inland vessels* (31 p.). Berlin: Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure. Retrieved August 16, 2025, from https://platina3.eu/download/gernot-paulii-and-jens-ley-on-energy-efficiency-indices-as-an-instrument-for-the-reduction-of-co2-emissions-of-inland-vessels/?ind=0

21. PLATINA 3. (2025, August 24). *Platform for the implementation of a future inland navigation action programme*. Retrieved August 24, 2025, from https://platina3.eu/download/5th-stage-all-presentations-and-agenda/

22. Waterborne Technology Platform. (2025, August 24). Retrieved August 24, 2025, from https://www.waterborne.eu/

23. European Maritime Safety Agency (EMSA). (2025, May 24). Retrieved May 24, 2025, from https://www.emsa.europa.eu/

24. Clean Shipping Coalition. (2025, August 24). Retrieved August 24, 2025, from https://cleanshipping.org/

25. Naval Group. (2017). *3D-printed propeller: the world's first with class approval*. Paris. Retrieved August 20, 2025, from https://www.3dnatives.com/de/ramlab-051220175/

26. HII Newport News Shipbuilding. (2018). *3D printing of a valve manifold for USS Enterprise*. Retrieved August 20, 2025, from https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/3d-objekte/newport-news-shipbuilding-setzt-auf-3d-druck-271153043/

27. International Organization for Standardization (ISO). (2016). *ISO 25178-2: Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters*. Retrieved from https://cdn.standards.iteh.ai/samples/46065/020e133c24d648119d70b0e3f3239233/ISO-25178-1-2016.pdf

28. ASTM International. (2020). *Standards for Additive Manufacturing* (ASTM F42 Committee on Additive Manufacturing Technologies). Retrieved from https://www.astm.org/

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 13.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 621.331:621.311.6.03 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.31

Н. П. СОКОЛОВА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації та енергоменеджменту
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0001-5190-2934

І. В. ПРОХОРЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації та енергоменеджменту
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0002-3397-662X

Н. А. ТИМОШЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматизації та енергоменеджменту
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0001-8378-6763

Т. А. МАЗУР
кандидат технічних наук,
доцент кафедри автоматизації та енергоменеджменту
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0001-8378-6763

СУЧАСНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

У даній роботі представлено комплексний аналіз сучасних автоматизованих систем моніторингу та обліку електроенергії, розглядаючи їх як ключовий інструмент цифрової трансформації. Актуальність дослідження зумовлена зростанням вартості енергоресурсів, посиленням екологічних вимог та необхідністю підвищення операційної ефективності. Центральним елементом аналізу є розгляд багаторівневої архітектури сучасних систем обліку (АСКОЕ, Smart Metering), яка забезпечує гнучкість та масштабованість рішень. На нижньому, вимірювальному рівні, інтелектуальні лічильники та датчики здійснюють первинний збір даних. Середній, комунікаційний рівень, функціонує як «нервова система», агрегуючи дані через промислові контролери та концентратори. Верхній, серверний рівень, є «мозком» системи, де відбувається зберігання та обробка інформації. Нарешті, аналітичний рівень надає користувачам інструменти для візуалізації, аналізу та прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Особливу увагу в статті приділено комунікаційним технологіям, що є основою для надійного та безпечного двостороннього обміну даними. Підкреслюється, що не існує єдиного універсального рішення, тому на практиці часто використовується гібридний підхід, що поєднує різні технології. Дротові технології, зокрема PLC (Power Line Communication), яка використовує існуючі силові лінії для передачі даних, що значно здешевлює розгортання масових систем, особливо в житловому секторі.

Бездротові технології, такі як стільникові мережі GSM/GPRS/LTE (для віддалених об'єктів та великих споживачів) та локальні радіомережі ZigBee і LoRaWAN, що ідеально підходять для «Інтернету речей» (IoT) завдяки низькому енергоспоживанню та здатності створювати самовідновлювані mesh-мережі. Перспективні напрями розвитку пов'язані з інтеграцією штучного інтелекту для предиктивного аналізу, використанням цифрових двійників та переходом до концепції Smart Energy Management, що визначатиме майбутнє енергетичної ефективності.

Ключові слова: *автоматизовані системи моніторингу, облік електроенергії, цифрова трансформація, автоматизована система моніторингу та обліку електроенергії, Smart Metering, інтелектуальні лічильники, штучний інтелект.*

© Соколова Н. П., Прохоренко І. В., Тимошенко Н. А., Мазур Т. А., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

N. P. SOKOLOVA
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation and Energy Management
State University "Kyiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0001-5190-2934

I. V. PROKHORENKO
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation and Energy Management
State University "Kyiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0002-3397-662X

N. A. TYMOSHENKO
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automation and Energy Management
State University "Kyiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0002-9713-7876

T. A. MASUR
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Automation and Energy Management
State University "Kyiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0001-8378-6763

MODERN ELECTRICITY MONITORING AND ACCOUNTING SYSTEMS

This paper presents a comprehensive analysis of modern automated electricity monitoring and accounting systems, considering them as a key tool for digital transformation. The relevance of the study is due to the increasing cost of energy resources, increasing environmental requirements and the need to increase operational efficiency. The central element of the analysis is a detailed consideration of the multi-level architecture of modern accounting systems (ASKOE, Smart Metering), which provides flexibility and scalability of solutions. At the lower, measuring level, smart meters and sensors perform primary data collection. The middle, communication level, functions as a "nervous system", aggregating data through industrial controllers and hubs. The upper, server level, is the "brain" of the system, where information is stored and processed. Finally, the analytical level provides users with tools for visualization, analysis and making informed management decisions.

The article pays special attention to communication technologies, which are the basis for reliable and secure two-way data exchange. It is emphasized that there is no single universal solution, therefore, in practice, a hybrid approach is often used that combines different technologies. Wired technologies, in particular PLC (Power Line Communication), which uses existing power lines for data transmission, which significantly reduces the cost of deploying mass systems, especially in the residential sector.

Wireless technologies, such as GSM/GPRS/LTE cellular networks (for remote sites and large consumers) and ZigBee and LoRaWAN local area radio networks, which are ideally suited for the "Internet of Things" (IoT) due to their low power consumption and the ability to create self-healing mesh networks. Promising development directions are associated with the integration of artificial intelligence for predictive analysis, the use of digital twins and the transition to the concept of Smart Energy Management, which will determine the future of energy efficiency.

Key words: *automated monitoring systems, electricity metering, digital transformation, automated electricity monitoring and metering system, Smart Metering, intelligent meters, artificial intelligence.*

Постановка проблеми

Розвиток сучасних енергетичних систем відбувається у тісному взаємозв'язку з глобальними процесами цифровізації. Підвищення вартості енергоресурсів, екологічні обмеження та вимоги до надійності енергопостачання зумовлюють необхідність удосконалення систем контролю та управління енергоспоживанням. У цьому контексті автоматизовані системи контролю та обліку енергоресурсів (АСКОЕ) виступають фундаментальною складовою сучасних підприємств і комунальних систем, оскільки забезпечують прозорість споживання, зниження енергетичних витрат та можливість оптимізації навантажень.

Проте розвиток технологій не обмежується лише класичними системами збору даних. Поява інтелектуальних лічильників та технологій Smart Metering стала якісно новим етапом у розвитку енергетики. На відміну від традиційних методів, орієнтованих лише на облік та комерційні розрахунки, Smart Metering передбачає інтеграцію з інформаційними мережами, двосторонній обмін даними, можливість управління навантаженням у режимі реального часу, а також залучення споживачів до процесу енергетичного менеджменту. Це створює підґрунтя для побудови Smart Grid – інтелектуальних енергетичних систем нового покоління.

Сьогодні більшість енергетичних компаній продовжують використовувати застарілі методи комерційного обліку, що базуються на ручному знятті показників або на періодичному автоматизованому зборі даних. Такий підхід має низку суттєвих недоліків:

По-перше, він не дозволяє здійснювати оперативний контроль параметрів споживання, що призводить до неможливості швидко реагувати на перевантаження, аварії чи несанкціоновані підключення.

По-друге, відсутність гнучкої тарифної політики не стимулює споживачів до зниження навантажень у години пікових потреб.

По-третє, різні виробники лічильників застосовують власні протоколи передачі даних, що ускладнює інтеграцію обладнання у єдину систему.

Таким чином, для вирішення окреслених проблем необхідна інтеграція нових комунікаційних технологій та створення єдиного цифрового середовища, здатного забезпечити безпечну, надійну та масштабовану інфраструктуру Smart Metering.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останнє десятиліття характеризується активними науковими розробками у сфері інтелектуального енергообліку. В українських і європейських роботах значна увага приділяється архітектурі АСКОЕ, методам їх інтеграції з корпоративними системами управління, а також економічному ефекту від впровадження таких рішень. У працях [1, 2] висвітлено методи підвищення енергоефективності за допомогою автоматизованих систем контролю, а також можливості інтеграції таких систем у загальну інфраструктуру енергоменеджменту підприємства. Автори [3, 4] розкривають сучасні підходи до систем енергоменеджменту, класифікацію SCADA-систем, архітектуру та функціональні можливості. Це становить базу для розуміння того, як SCADA інтегрується у виробниче середовище та які рішення підтримують енергетичний моніторинг. У працях [5, 6] розглядає аналіз комунікаційних технологій для Smart Metering у міських агломераціях. Вона підкреслює роль надійних комунікаційних систем для збору даних з численних вузлів обліку. У дослідженнях [7, 8] надається огляд штучного інтелекту, що є ключовим для підвищення динамічності та адаптивності систем управління енергією за допомогою AI-технологій.

Формулювання мети дослідження

Метою даної статті є систематизація підходів до побудови автоматизованих систем енергообліку, аналіз новітніх комунікаційних технологій Smart Metering, а також визначення перспективних напрямів розвитку таких систем у промисловості, енергетиці та житлово-комунальному господарстві.

Викладення основного матеріалу дослідження

Типова архітектура автоматизованої системи комерційного обліку електричної енергії (АСКОЕ) (рис. 1) являє собою ієрархічну, багаторівневу структуру, розроблену для ефективного моніторингу, збору, обробки та аналізу даних про споживання електроенергії. Ця архітектура забезпечує високу точність обліку, прозорість даних та підтримку прийняття управлінських рішень.

Типова архітектура АСКОЕ включає кілька функціональних рівнів:

Рівень вимірювання – інтелектуальні лічильники, сенсори напруги та струму, датчики навантажень.

Рівень збору даних – локальні контролери та концентратори, що виконують первинну обробку інформації та її буферизацію.

Серверний рівень – системи управління базами даних, аналітичні модулі, SCADA-системи, що забезпечують централізований контроль.

Рівень управління холдингом – корпоративні платформи ERP та EMS, що дозволяють інтегрувати енергетичні дані у бізнес-процеси підприємства. До основних переваг такого багаторівневого структурування можна віднести:



Рис. 1. Типова архітектура АСКОЕ по рівнях

Масштабованість – можливість додавати нові пристрої на рівні вимірювання або розширювати функціонал на верхніх рівнях без значної перебудови всієї системи.

Модульність – окремі рівні та їх компоненти можуть оновлюватися або замінюватися незалежно, що спрощує обслуговування та модернізацію.

Надійність та відмовостійкість – розподіл функцій між рівнями підвищує загальну надійність. Наприклад, втрата зв'язку з серверним рівнем не призводить до втрати даних на рівні збору, завдяки буферизації.

Оптимізація потоків даних – фільтрація та первинна обробка даних на нижчих рівнях зменшує обсяг інформації, що передається та обробляється на верхніх рівнях, знижуючи навантаження на мережу та сервери.

Гнучкість та інтеграція – завдяки стандартизованим інтерфейсам та протоколам, АСКОЕ легко інтегрується з іншими корпоративними системами, створюючи єдиний інформаційний простір.

Безпека – можливість реалізації багаторівневих стратегій кібербезпеки, що включають фізичний захист на рівні вимірювання, мережеву безпеку на рівні збору даних та захист застосунків на серверному рівні.

Таке багаторівневе структурування дозволяє не лише оптимізувати потоки даних, а й забезпечує масштабованість системи, можливість поступового оновлення компонентів та інтеграцію з новими технологіями. Саме цей підхід приводить нас до концепції Smart Metering – системи передачі та аналізу даних споживання електроенергії в реальному часі або близько до нього. Еволюція систем енергообліку від AMR (Automatic Meter Reading) до AMM (Automated Meter Management), та, зрештою, до Smart Grid свідчить про зростаючу роль інформаційних технологій в енергетиці. Якщо AMR забезпечувала лише автоматизоване зчитування показників, то AMI вже дозволяє двосторонню комунікацію, управління навантаженням, діагностику обладнання та впровадження гнучких тарифів.

Особливість Smart Metering (рис. 2) полягає у створенні динамічного енергетичного середовища, де кожен споживач може бути не лише користувачем, а й виробником енергії (prosumer). Це відкриває можливості для інтеграції відновлюваних джерел енергії, розвитку локальних мікромереж та застосування блокчейн-технологій у комерційному обліку.

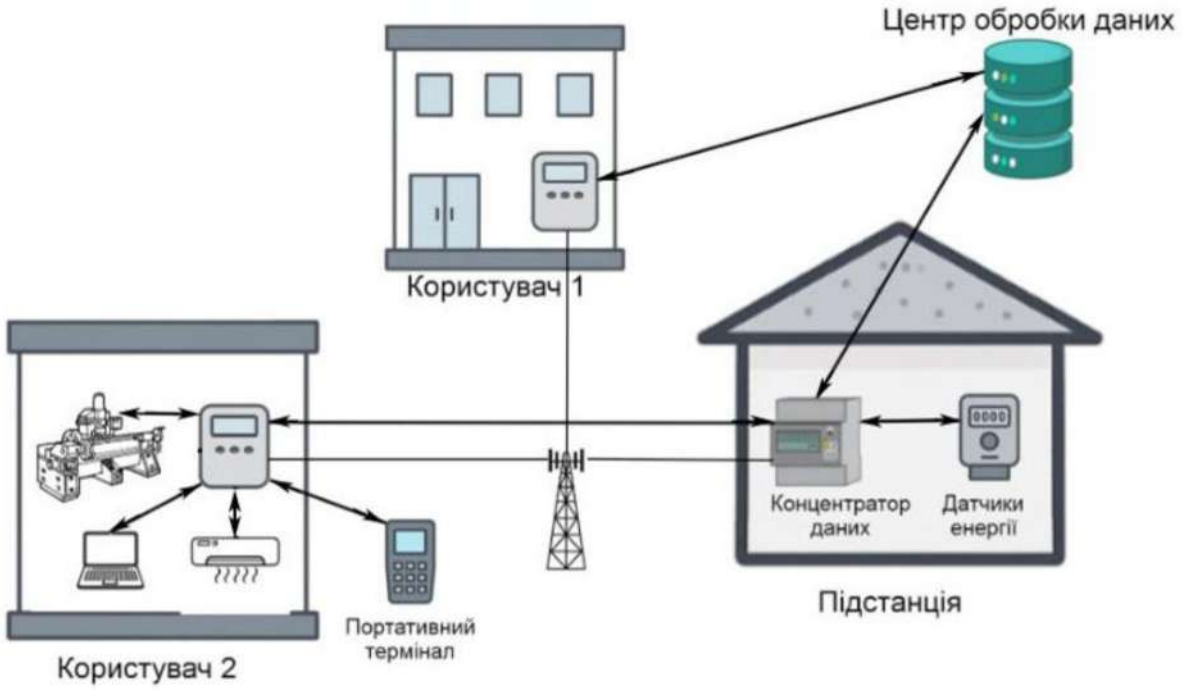


Рис. 2. Система Smart Metering та її компоненти

Надійна робота Smart Metering безпосередньо залежить від вибору телекомунікаційної інфраструктури. На даний час застосовуються такі технології:

Бездротові – GSM/GPRS/EDGE, LTE, 5G – забезпечують високу швидкість передачі даних і охоплюють значні території. ZigBee та 6LoWPAN орієнтовані на локальні енергоефективні мережі з низьким енергоспоживанням. WiMAX та Wi-Fi застосовуються у корпоративних мережах.

Дротові – PLC (Power Line Communication) із стандартами PRIME і SITRED, що використовують наявні електричні мережі як канал зв'язку; M-Bus для теплових, газових і водяних лічильників; DLMS/COSEM та IEC 61850 як протоколи стандартизації. Гібридні рішення поєднують дротові та бездротові технології, що підвищує надійність і дає змоги балансувати навантаження на комунікаційну мережу. Міжнародний досвід підтверджує

ефективність таких технологій. В Італії вже встановлено понад 30 мільйонів інтелектуальних лічильників на базі PLC, у Франції реалізується програма Linky, що передбачає масове розгортання Smart Metering із двостороннім зв'язком, а у країнах Скандинавії успішно використовується LTE для управління енергетичними мережами.

Подальший розвиток Smart Metering пов'язаний із впровадженням індустріального інтернету речей (IIoT), технологій Big Data та штучного інтелекту. Завдяки цьому можливо здійснювати:

– прогнозування навантажень з урахуванням погодних умов та поведінки споживачів;
– виявлення аномалій у споживанні, що свідчать про аварійні стани чи крадіжки енергії;
– оптимізацію генерації та розподілу, включаючи балансування відновлюваних джерел;
– створення цифрових двійників енергетичних систем для моделювання та тестування режимів роботи.

Таким чином, Smart Metering стає не лише системою обліку, а комплексною платформою управління енергетичними процесами.

Висновки

Проведене дослідження підтверджує, що впровадження автоматизованих систем контролю та обліку енергоресурсів у поєднанні з технологіями Smart Metering є необхідною умовою сучасної цифрової трансформації енергетики. Такі системи дозволяють не лише здійснювати комерційний облік, а й формувати комплексне інформаційне середовище, у якому забезпечується прозорість енергоспоживання, оперативність реагування на аварійні ситуації та підвищення ефективності використання енергоресурсів.

Важливим аспектом розвитку Smart Metering є створення надійної комунікаційної інфраструктури. Результати аналізу свідчать, що застосування різних каналів передачі даних – від PLC-технологій до сучасних мобільних стандартів LTE та 5G – дозволяє реалізувати масштабовані й стійкі до збоїв системи, адаптовані до потреб як промислових підприємств, так і житлово-комунального сектору. При цьому міжнародні стандарти IEC та IEEE, а також ініціативи Європейського Союзу щодо відкритих протоколів забезпечують сумісність обладнання різних виробників і сприяють розвитку конкурентного ринку. Інтеграція Smart Metering з корпоративними інформаційними системами, такими як SCADA, ERP та EMS, розширює його функціональні можливості, перетворюючи традиційну систему обліку на інтелектуальну аналітичну платформу.

Використання технологій штучного інтелекту, великих даних і цифрових двійників дозволяє прогнозувати енергетичні навантаження, виявляти аномалії у споживанні та оптимізувати роботу генеруючих і розподільчих систем.

Отже, інтелектуальні системи енергообліку та комунікаційні технології Smart Metering становлять основу для побудови енергетики нового покоління, орієнтованої на сталий розвиток, енергоефективність та інтеграцію відновлюваних джерел. Перспективи подальших досліджень полягають у розробці методів використання блокчейн-технологій у комерційному обліку, впровадженні мобільних сервісів для взаємодії з кінцевим споживачем, а також у дослідженні можливостей мереж 5G та 6G для побудови повноцінних енергетичних екосистем.

Список використаної літератури

1. ISO 50001:2018. Energy management systems – Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization, 2018. 36 p.
2. ДСТУ EN 62053-21:2017. Прилади для вимірювання електричної енергії (стаціонарні прилади) класів точності 1 і 2. [Чинний від 01.07.2019]. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2017.
3. Мазур І. І., Остроух А. В., Кондратюк Д. М. Системи енергоменеджменту: сучасні підходи та інструменти // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Енергетика. 2021. № 2. С. 22–29.
4. Бурмістров С. Ю. Автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ): технології та досвід впровадження // Електротехніка і електромеханіка. 2020. № 4. С. 14–19.
5. Гаврилюк В. М., Черненко О. О. Енергетичний аудит та енергоефективність підприємств: монографія. Київ : НТУУ «КПІ», 2019. 164 с.
6. Козлов В. А. Технології SCADA в енергетиці: огляд можливостей // Електротехніка і автоматизація. 2022. № 1. С. 40–45.
7. Поліщук, В. Й. Аналіз комунікаційних технологій для Smart Metering в умовах міських агломерацій / В. Й. Поліщук, О. В. Мороз // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електроенергетики». 2019. Частина 3. С. 102–106.
8. Singh, S., & Singh, J. (2018). Artificial intelligence in smart grid: A review. Journal of Cleaner Production, 172, 481–494.
9. Galli, S., Scaglione, A., & Wang, Z. (2011). For the grid and through the grid: the role of power line communications in the smart grid. Proceedings of the IEEE, 99(6), 998–1027.

References

1. ISO. (2018). *ISO 50001:2018 – Energy management systems – Requirements with guidance for use*. International Organization for Standardization.

2. Ukrainian Research and Training Center for Standardization. (2017). *DSTU EN 62053-21:2017. Electricity metering equipment (stationary meters) classes 1 and 2*.

3. Mazur, I. I., Ostroukh, A. V., & Kondratiuk, D. M. (2021). Energy management systems: modern approaches and tools. *Bulletin of NTUU "KPI". Series: Power Engineering*, (2), 22–29.

4. Burmistrov, S. Y. (2020). Automated systems for commercial electricity metering (ASCEM): technologies and implementation experience. *Electrical Engineering and Electromechanics*, (4), 14–19.

5. Havryliuk, V. M., & Chernenko, O. O. (2019). Energy audit and energy efficiency of enterprises: Monograph. Kyiv : NTUU "KPI".

6. Kozlov, V. A. (2022). SCADA technologies in energy: capabilities overview. Electrical Engineering and Automation, (1), 40–45.

7. Polyshchuk, V. Y., & Moroz, O. V. (2019). Analysis of communications technologies for Smart Metering in urban agglomerations. In Technical Electrodynamics: Thematic Issue "Problems of Modern Electric Power Industry" (Part 3, pp. 102–106).

8. Singh, S., & Singh, J. (2018). Artificial intelligence in smart grid: A review. Journal of Cleaner Production, 172, 481–494.

9. Galli, S., Scaglione, A., & Wang, Z. (2011). For the grid and through the grid: the role of power line communications in the smart grid. Proceedings of the IEEE, 99(6), 998–1027.

Дата першого надходження рукопису до видання: 18.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 14.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 504.61:355.01]:631.4 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.32

М. І. СОЛОД
кандидат технічних наук, науковий співробітник
Науково-дослідна лабораторія синтезу мономерів НДЛ-37
Національного університету «Львівська політехніка»
ORCID: 0009-0006-1478-9382

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ ҐРУНТІВ ВНАСЛІДОК ВІЙСЬКОВО-АНТРОПОГЕННИХ ВПЛИВІВ

У даній роботі розглянуто досвід Європейського Союзу стосовно досліджень хімічного складу ґрунтів сільськогосподарських угідь, а також виконано порівняльні дослідження зразків ґрунту з територій України, що короткий час перебували під окупацією. Значний діапазон досліджень в Європі було проведено у XXI столітті для укладання мапи розповсюдження тих чи інших хімічних елементів, їхнього вмісту у сільськогосподарських рослинах та, відповідно, впливу на здоров'я споживачів сільськогосподарської продукції. Особливу увагу було приділено тим хімічним елементам, що їх Всесвітня організація охорони здоров'я визнала безумовно небезпечними для організму людини, а саме кадмію, свинцю, миш'яку та діоксинам. Найбільш ретельно було досліджено території, де відбувалися військові дії під час І Світової війни, і які не були рекультивовані дотепер. Дослідження цих територій з відбором проб із воронок та із поверхні ґрунту показали, що через сто років після бойових дій на таких територіях все ще можна спостерігати надлишки шкідливих хімічних елементів. В Україні під час війни неможливо проводити такі дослідження в районах активних бойових дій, але їх потрібно здійснювати в місцевостях, які було звільнено від окупації, та які можливо надалі використовувати у сільському господарстві. Було проведено відбір ґрунтів в декількох місцевостях Київської області та проведено їх дослідження в лабораторних умовах. Було відмічено незначне підвищення вмісту кадмію, свинцю та марганцю у деяких пробах порівняно із пробами, відібраними у Львівській області. Зважаючи на умови відбору проб у місцевостях, що зазнали артилерійських обстрілів, а саме, на небезпеку мін та нерозірваних боєприпасів, більш докладний аналіз не є можливим, але після деактивації вибухонебезпечних залишків докладне вивчення складу хімічних елементів з врахуванням досвіду Європейського Союзу у ґрунтах на звільнених територіях є необхідною процедурою для подальшого їх використання.

Ключові слова: *забруднення ґрунтів, небезпечні хімічні елементи, антропогенний вплив, рекультивація угідь, досвід Європейського Союзу.*

M. I. SOLOD
PhD in Technical Sciences, Research Associate
Research Laboratory of Monomer Synthesis RL-37
of Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0009-0006-1478-9382

THE REASEARCH ON SOIL CONTAMINATION DUE TO MILITARY-ANTHROPOGENIC INFLUENCES

This work examines the experience of the European Union regarding studies of the chemical composition of agricultural land soils, as well as comparative studies of soil samples from the territories of Ukraine that were under occupation for a short time. A considerable range of research in Europe was carried out in the 21st century to compile a map of the distribution of certain chemical elements, their content in agricultural plants and, accordingly, the impact on the health of consumers of agricultural products. Particular attention was paid to those chemical elements which were deemed by the World Health Organization to be definitely dangerous for the human body, namely cadmium, lead, arsenic and dioxins. The territories where military operations took place during World War I, and which have not been reclaimed until now, were most carefully investigated. Surveys of these areas, with sampling from craters and from the smooth soil surface, have shown that one hundred years after the fighting, surpluses of harmful chemical elements can still be observed in such areas. In Ukraine, during the war, it is impossible to conduct such research in areas of active hostilities, but it must be carried out in areas that were freed from occupation and that can be used in agriculture in the future. Soils were selected in several areas of the Kyiv region and their research was carried out in laboratory conditions. A slight increase in the content of cadmium, lead and manganese in some samples was noted compared to samples taken in the Lviv region. Taking into account the conditions of sampling in areas subjected to artillery fire, namely, the danger of mines and unexploded ordnance, a more detailed analysis is not possible, but after the deactivation of explosive residues, a detailed

© Солод М. І., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

study of the composition of chemical elements, taking into account the experience of the European Union in the soils in the liberated territories, is a necessary procedure for their further use.

Key words: *soil contamination, dangerous chemical elements, anthropogenic influence, land reclamation, experience of the European Union.*

Постановка проблеми

Ґрунт відіграє центральну роль у безпеці харчових продуктів, оскільки він визначає можливий склад харчових продуктів і кормів в основі харчового ланцюга. Однак якість ґрунтових ресурсів, визначена їхнім потенційним впливом на здоров'я людини шляхом розповсюдження шкідливих елементів через харчовий ланцюг, була вивчена в Європі не найкращим чином через відсутність даних належної деталізації та надійності. Перша в Європейському Союзі узгоджена процедура відбору проб верхнього шару ґрунту та узгоджена аналітична процедура дали вимірювання мікроелементів приблизно з 22 000 місць. Цей унікальний збір інформації дає змогу отримати надійний огляд концентрації важких металів, включаючи As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn, Sb. Co і Ni, на регіональному рівні [3].

В той же час, Україна вже третій рік знаходиться в стані війни, та її території піддаються обстрілам артилерії з різнокаліберними боєприпасами. Значна кількість залишків оболонок снарядів, що розірвалися, або потрапили в ґрунти нерозірваними, поступово розкладаються, змінюючи структуру сільськогосподарських угідь і забруднюючи їх різноманітними хімічними елементами, що можуть надалі, після закінчення війни та рекультивації звільнених земель, призвести до потрапляння шкідливих речовин у харчові продукти.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження, спрямовані на вивчення впливу забруднень ґрунтів внаслідок військових дій у Європі та створення подальших рекультиваційних програм, мають на меті впровадження нових підходів до дослідження таких забруднень в Україні на основі європейського досвіду. Діяльність численних європейських організацій під егідою Європейського Союзу в тісній співпраці, в умовах чіткого розподілу дослідницьких зобов'язань та за допомоги неприбуткових організацій призводить до виявлення та аналізу територій з підвищеною концентрацією забруднень ґрунтів, що виникли внаслідок І Світової війни. Над дослідженням проблеми працювали, зокрема, такі організації, як Всесвітня організація охорони здоров'я, Європейський комітет стандартизації, Європейське агентство з безпеки харчових продуктів, світові науковці А. Баба, Дж. Бофф, В. Вудс, Е. Гуда, Т. Кьолер, Р. Ладо, Г. Ройтер, Г. Чертіні тощо, та українські науковці О. Бондар, Д. Бухова, А. Сакун, В. Ціко та інші досліджували важливість дослідження впливу забруднень ґрунтів внаслідок військових дій. Однак, європейські країни мають значний досвід у дослідженнях забруднень ґрунтів внаслідок І Світової війни, отже варто його розглянути та дослідити як зразки ґрунтів із звільнених територій, так і можливості застосування таких досліджень перед рекультивацією звільнених сільськогосподарських угідь України.

Формулювання мети дослідження

Проаналізувати досвід Європейського Союзу стосовно досліджень впливу забруднень ґрунтів внаслідок військових дій та здійснити аналіз ґрунтів в регіонах України, звільнених від окупації.

Викладення основного матеріалу дослідження

Аналіз ґрунту у післявоєнний період має на меті оцінку пошкоджень від механічних впливів, а також хімічного забруднення вибуховими та токсичними речовинами. Фізико-хімічні випробування ґрунту на місці для вимірювання концентрації важких металів та інших забруднюючих речовин мають надзвичайне значення для визначення масштабу та ступеня забруднення, особливо речовинами, небезпечними для здоров'я громадян.

Кадмій чинить токсичну дію на нирки, а також на скелетну та дихальну системи. Він класифікується як канцероген для людини. Кадмій може долати великі відстані від джерела викидів шляхом атмосферного переносу. Він легко накопичується в багатьох організмах, зокрема в молюсках і ракоподібних. Нижчі концентрації містяться в овочах, злаках і крохмалистих коренях. Вплив на людину відбувається в основному через споживання зараженої їжі, активне та пасивне вдихання тютюнового диму та вдихання працівниками низки галузей промисловості. ВООЗ визначає кадмій та свинець проміж 10 хімічних речовин, що викликають серйозне занепокоєння у сфері охорони здоров'я, що вимагає дій держав-членів для захисту здоров'я працівників, дітей і жінок репродуктивного віку [15].

У Європі Перша світова війна залишила у спадок забруднене навколишнє середовище через широке та інтенсивне використання артилерії в цей період [10]. Європейським Союзом було проведено дослідження у невеликій лісистій місцевості у регіоні Па-де-Кале у Франції, яка зазнала значно менш інтенсивних пожеж, ніж раніше вивчені поля битв Першої світової війни. Однак, під час артилерійських обстрілів відбулися значні фізичні зміни в ландшафті, що отримали назву «бомбтурбація» (англ. – «bombturbation») [8], що, в свою чергу, призвело до розшарування ґрунту у воронках. Воронки призвели до вищих значень органічної речовини та електропровідності, але, на відміну від інших досліджень, не мають істотної різниці в pH ґрунту. Концентрації важких металів у ґрунті не відрізнялися в межах кратерів порівняно з рівнинним ландшафтом. Однак збагачення свинцем (Pb), міддю (Cu) та кадмієм (Cd) спостерігалося вище базових значень для регіону [12]. Незважаючи на те, що середні концентрації Cd та Pb знаходяться в стандартних межах для ґрунтів у Великобританії та Європейському Союзі,

ймовірно, що збагачення Cd та Pb у спостережуваних концентраціях спричинило шкідливий екотоксикологічний вплив і вплив на здоров'я людини [5].

Шкода навколишньому середовищу була не тільки побічним продуктом, але й часто навмисною стратегією війни з часів стародавнього світу. У XX столітті масштаби війни зросли до промислового рівня [6]. Колишні поля битв Першої світової війни являють особливий інтерес через характер цієї війни: «статичний фронт», сформований на Західному фронті [2], який залишався на місці майже весь період бойових дій. Це призвело до надзвичайної концентрації вогню артилерії та стрілецької зброї на західному фронті, з 1,45 мільярдами снарядів, випущених під час Першої світової війни [11].

Бомбтурбація [8, с. 174] є формою руйнування ґрунту, спричиненого використанням вибухових боєприпасів, починаючи від гранат і закінчуючи важкою артилерією. Після цього фізична структура ґрунту може бути суттєво порушена або повністю зруйнована [9]. Таким чином, утворився новий топографічний ландшафт, що призвело до нових гідрологічних умов і умов вивітрювання породи [8].

Антропогенні джерела важких металів у навколишньому середовищі зазвичай включають промислові процеси, сільське господарство, стічні води, гірничодобувні та металургійні процеси. Однак дослідження хімічної спадщини Першої світової війни вже встановили наявність металевих забруднювачів, таких як мідь, кадмій, свинець, миш'як і цинк, з боєприпасів на багатьох театрах конфлікту [1, с. 660]. В результаті інтенсивних боїв відкладення куль, осколків і порохових гільз спричинило забруднення ґрунту важкими металами [7], оскільки вони в основному складалися зі свинцю (Pb), міді (Cu), цинку (Zn) і сталі [14, с. 112].

Ці дослідження були частиною детального аналіз вмісту важких металів (ВМ) у сільськогосподарських ґрунтах Європейського Союзу [4]. Аналіз охопив основні потенційно токсичні елементи, а саме As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn, Sb, Co та Ni. Вміст важких металів у ґрунті оцінювали за специфічними для елементів пороговими значеннями забруднення та потреб у рекультивації. Даючи нове розуміння рівня забруднення ґрунту ВМ і підкреслюючи необхідність активізації моніторингу або вжиття заходів з відновлення для усунення ризиків для здоров'я людини в конкретних регіонах, дослідження не охоплює такі аспекти, як біодоступність елементів різними видами рослин або потенційний диференційований вплив елементарного видоутворення на екологічні умови чи здоров'я людини [13].

Кількість забруднених ділянок у Європейському Союзі та території, що постраждала від різних видів забруднення, з яких рекультивація коштуватиме €17,3 млрд щорічно [3, с. 4] підкреслює масштаби проблеми на континенті. Окрім забруднення ґрунту, яке може призвести до погіршення якості води та низки негативних впливів на навколишнє середовище, поширення важких металів по всьому харчовому ланцюгу має серйозні наслідки для здоров'я людини [13]. Незважаючи на критичність забруднення важкими металами, досі не було достатньо даних, щоб забезпечити надійне уявлення про реальні масштаби проблеми в Європі та в усьому світі.

В Україні сьогодні, в реаліях війни, проводити дослідження ґрунтів можливо лише на звільнених територіях, та, зважаючи на наявність невиявлених вибухонебезпечних елементів (міни, нерозірвані боєприпаси), вони не можуть бути проведені у повному обсязі, з дослідженням ущільнення поверхні, чи отримання даних з воронок від снарядів, хоча після визволення сільськогосподарських угідь такі дослідження потрібно провести якомога швидше для подальшої рекультивації та відновлення екологічно чистого середовища. Однак перші кроки було зроблено, здійснивши дослідження проб ґрунту, отриманих з визволених територій у Київській області та, для порівняння, проб ґрунту з Львівської області.

Як видно із Таблиць 1–3, проведено лабораторні дослідження та отримано дані про pH, наявність нітратів та хімічний склад ґрунтів з наголосом на вміст важких металів та нафтопродукти.

Таблиця 1

Місце відбору, прив'язка до місцевості	Площа земельної ділянки, м²	Глибина відбору, м	Назва	Одиниці вимірювання	Результат вимірювання	ГДК
18.07.2024р Львівська обл, Стрийський р-н, розвід. Сверд. № 703 «Більче-Волицьке» На схід від с. П'ятничани; 30м на пдсх від бурової 49°21'55.1''N 23°58'40.1''E	35	0,05–0,2	pH (водна витяжка)	Од. pH	7,70	–
			Амоній (обмінний) у перерахунку на азот амонійний $N(NH_4^+)$	мг/кг	2,8	–
			Нітрати NO_3 (алюмокалієва витяжка)		17,0	130,0
			Сульфати (водна витяжка)		157,2	160,0
			Фосфати		20,2	–
			Залізо (рухома форма)		262,0	–
			Кальцій		1,62	–
			Нафтопродукти		169,2	1000
			Кадмій		0,4	1,5
			Свинець		16	32,0
			Манган		1054	1500

* ГДК – Гранично допустима концентрація

Таблиця 2

Місце відбору, прив'язка до місцевості	Площа земельної ділянки, м²	Глибина відбору, м	Назва	Позначення одиниці вимірювання	Результат вимірювання	ГДК
10.09.2024р Київська обл., Вишгород-ський р-н, с. Іванків	35	0,05–0,2	pH (водна витяжка)	Од. pH	8,2	–
			Загальна твердість	моль/дм³	5,1	–
			Вологість	%	43	–
			Амоній (обмінний) у перерахунку на Азот амонійний $N(NH_4^+)$	мг/кг	10,1	–
			Нітрати	мг/дм³	170,2	130,0
			Сульфати (водна витяжка)	мг/дм³	75,0	160,0
			Фосфати	мг/кг	31,6	–
			Залізо	мг/кг	65,4	–
			Калій	мг/дм³	50,1	–
			Нафтопродукти	мг/кг	667,0	500,0
			Кадмій	мг/кг	1,4	1,5
			Свинець	мг/кг	29,0	32,0
			Манган	мг/кг	1470	1500

Таблиця 3

Місце відбору, прив'язка до місцевості	Площа земельної ділянки, м²	Глибина відбору, м	Назва	Одиниці вимірювання	Результат вимірювання	ГДК
25.09.2024 р Київська обл., Бучанський р-н, с. Ворзель, вул. Лісова, 80;	20	0,05–0,2	pH (водна витяжка)	Од. pH	7,2	–
			Загальна твердість	моль/дм³	6,1	–
			Вологість	%	46	–
			Амоній (обмінний) у перерахунку на Азот амонійний $N(NH_4^+)$	мг/кг	10,1	–
			Нітрати	мг/дм³	164,2	130,0
			Хлориди (водна витяжка)	мг/дм³	70,5	–
			Сульфати (водна витяжка)	мг/дм³	86,0	160,0
			Фосфати	мг/кг	31,2	–
			Залізо	мг/кг	262,4	–
			Калій	мг/дм³	67,1	–
			Нафтопродукти	мг/кг	545,2	500,0
			Кадмій	мг/кг	1,6	1,5
			Свинець	мг/кг	27,0	32,0
			Манган	мг/кг	1520	1500

Висновки

У результаті проведених досліджень було виявлено, що ґрунти на територіях, де велися активні бойові дії, зазнали суттєвих забруднень, зокрема нафтопродуктами, мають підвищений вміст нітратів, заліза та важких металів. Зокрема, у с. Іванків Вишгородського району Київської області відмічено значне перевищення вмісту нітратів та нафтопродуктів у ґрунті; у с. Ворзель Бучанського району Київської області – перевищення рівня нітратів, нафтопродуктів, кадмію та мангану. Ці землі потребують очищення та довготривалої рекультивації.

На інших досліджених земельних ділянках суттєвого забруднення ґрунтів, що перевищують рівень ГДК, не виявлено, однак як тільки звільнені території будуть очищені від вибухонебезпечних матеріалів, вони вимагатимуть негайного докладного дослідження, спираючись на досвід Європейського Союзу.

Список використаної літератури

1. Baba A., Deniz O. Effect of warfare waste on soil: A case study of Gallipoli peninsula (Turkey). *International Journal of Environment and Pollution*, 22. 2004. P. 657–675. https://doi.org/10.1504/IJEP.2004.006056

2. Boff J. Fighting the First World War: Stalemate and attrition. *British Library*. 2018. URL: https://www.bl

3. Commission of the European Communities (CEC). Thematic Strategy for Soil Protection. Brussels: CEC, 2006. 12 p.

4. Certini G., Scalenghe R., Woods W.. The impact of warfare on the soil environment. *Earth-Science Reviews*, 127. 2013. P. 1–15. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.08.009

5. European Food Safety Authority (EFSA). Lead dietary exposure in the European population. Scientific report of EFSA. *The EFSA Journal*, 10 (7). 2012. P. 2831. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2831

6. Francis R., Krishnamurthy K. Human conflict and ecosystem services: Finding the environmental price of warfare. *International Affairs*, 90(4). 2014. P. 853–869. DOI:10.1111/1468-2346.12144

7. Hasnine T., Huda E., Khatun R., Saadat A. Heavy metal contamination in agricultural soil at DEPZA, Bangladesh. *Environment and Ecology Research*, 5(7). 2017. P. 510–516. DOI:10.13189/eer.2017.050707

8. Hupy J., Koehler T. Modern warfare as a significant form of zoogeomorphic disturbance upon the landscape. *Geomorphology*, 2012. P. 157–158, 169–182. DOI:10.1016/j.geomorph.2011.05.024

9. Hupy J. P., Schaetzl R. J. Introducing "bombturbation", a singular type of soil disturbance and mixing. *Soil Science*, 171. 2006. P. 823–836. DOI:10.1097/01.ss.0000228053.08087.19

10. Lado L.R., Hengl T., Reuter H.I. Heavy metals in European soils: a geostatistical analysis of the FOREGS Geochemical database. *Geoderma*, 148. 2008, P.189–199. DOI:10.1016/J.GEODERMA.2008.09.020

11. Prentiss A. M. Chemicals in war. London: McGraw-Hill publishing co. ltd, 1937. XVIII+739 p.

12. Souvent P., Pirc S. Pollution caused by metallic fragments introduced into soils because of World War I activities. *Environmental Geology*, 40(3). 2001. P. 317–323. DOI:10.1007/s002540000156

13. Tóth G., Hermann T., Da Silva M.R., Montanarella L. Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment International*, Volume 88. 2016. P. 299–309. https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.017

14. Watson A. Ring of steel: Germany and Austria-Hungary at war, 1914–1918. England, London: Penguin Books Ltd, 2015. 608 p.

15. World Health Organisation. 10 chemicals of public health concern. World Health Organisation, 2020. URL: https://www.who.int/news-room/photo-story/detail/10-chemicals-of-public-health-concern

References

1. Baba, A., & Deniz, O. (2004). Effect of warfare waste on soil: A case study of Gallipoli peninsula (Turkey). *International Journal of Environment and Pollution*, 22, 657–675. https://doi.org/10.1504/IJEP.2004.006056

2. Boff, J. (2018). Fighting the First World War: Stalemate and attrition, *British Library*. [online] Available at: https://www.bl

3. Commission of the European Communities (CEC) (2006). Thematic Strategy for Soil Protection. Brussels: CEC.

4. Certini, G., Scalenghe, R., & Woods, W. (2013). The impact of warfare on the soil environment. *Earth-Science Reviews*, 127, 1–15. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.08.009

5. European Food Safety Authority (EFSA). (2012). Lead dietary exposure in the European population. Scientific report of EFSA. *The EFSA Journal*, 10 (7). p. 2831. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2012.2831

6. Francis, R., & Krishnamurthy, K. (2014). Human conflict and ecosystem services: Finding the environmental price of warfare. *International Affairs*, 90(4), 853–869. DOI:10.1111/1468-2346.12144

7. Hasnine, T., Huda, E., Khatun, R., & Saadat, A. (2017). Heavy metal contamination in agricultural soil at DEPZA, Bangladesh. *Environment and Ecology Research*, 5(7), 510–516. DOI:10.13189/eer.2017.050707

8. Hupy, J., & Koehler, T. (2012). Modern warfare as a significant form of zoogeomorphic disturbance upon the landscape. *Geomorphology*, 157–158, 169–182. DOI:10.1016/j.geomorph.2011.05.024

9. Hupy, J. P., & Schaetzl, R. J. (2006). Introducing "bombturbation", a singular type of soil disturbance and mixing. *Soil Science*, 171, 823–836. DOI:10.1097/01.ss.0000228053.08087.19

10. Lado, L. R., Hengl T., & Reuter H. I. (2008). Heavy metals in European soils: a geostatistical analysis of the FOREGS Geochemical database. *Geoderma*, 148. pp.189-199. DOI:10.1016/J.GEODERMA.2008.09.020

11. Prentiss, A. M. (1937). *Chemicals in war*. London: McGraw-Hill publishing co., ltd. Pp. XVIII+739.

12. Souvent, P., & Pirc, S. (2001). Pollution caused by metallic fragments introduced into soils because of World War I activities. *Environmental Geology*, 40(3), 317–323. DOI: 10.1007/s002540000156

13. Tóth, G., Hermann, T., Da Silva, M. R., Montanarella, L. (2016). Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment International*, Volume 88. 299–309. https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.017

14. Watson, A. (2015). Ring of steel: Germany and Austria-Hungary at war, 1914–1918. England, London : Penguin Books Ltd. 608 p.

15. World Health Organisation. (2020). 10 chemicals of public health concern. World Health Organisation. Available at: https://www.who.int/news-room/photo-story/detail/10-chemicals-of-public-health-concern

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 23.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 620.92 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.33

Д. М. СТЕПАНЧИКОВ
кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-5027-2213

Н. Л. ДОН
кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-9503-5326

ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПУ МАКСИМУМУ ЕНТРОПІЇ У ВІТРОЕНЕРГЕТИЦІ

Відновлювальні джерела енергії привертають до себе значну увагу внаслідок останньої енергетичної кризи та необхідності отримувати екологічно чисту енергію. Енергія вітру є одним з найважливіших відновлювальних джерел енергії. У галузі перетворення енергії вітру, точне визначення розподілу ймовірностей швидкості вітру гарантує ефективне використання енергії вітру, тим самим покращуючи позиції вітроенергетики. Частіше для опису такого розподілу використовують двопараметричну функцію Вейбула. Проте для випадків, коли розподіл швидкості вітру по градаціях має нетиповий для відкритих місцевостей характер точності функції Вейбула буває недостатньо.

В роботі представлено результати математичного моделювання вітрового потенціалу та визначення продуктивності вітроенергетичної установки на підставі принципу максимуму ентропії із застосуванням сучасних математичних, статистичних і комп'ютерних методів розрахунку та аналізу.

Розроблено методику застосування принципу максимуму ентропії для опису функції розподілу швидкості вітру. Показано, що застосування пакету Curve Fitting системи Matlab дозволяє значно спростити та автоматизувати процес визначення множників Лагранжа. Визначено оптимальні функції розподілу швидкості вітру, отримані за методом максимуму ентропії для різної кількості моментних функцій. Статистичні характеристики розроблених розподілів порівнюються з характеристиками традиційних розподілів Вейбула. Доведено, що опис питомої потужності вітрового потоку на основі методу максимуму ентропії має найбільшу точність і краще відображає особливості експериментального розподілу швидкості вітру.

На підставі отриманих розподілів швидкості вітру визначено вітроенергетичний потенціал місцевості. Показано, що метод максимуму ентропії дає найкраще узгодження з експериментальними даними.

Застосування розробленого інструментарію дозволяє підвищити точність математичного моделювання розподілу швидкості вітру, а з цим і точність довгострокового прогнозування виробітку електроенергії вітроенергетичною установкою.

Ключові слова: *вітроенергетика, принцип максимуму ентропії, функція розподілу, вітроенергетичний потенціал, розподіл Вейбула.*

D. M. STEPANCHIKOV
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy,
Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-5027-2213

N. L. DON
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy,
Electrical Engineering and Physics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-9503-5326

© Степанчиков Д. М., Дон Н. Л., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

APPLICATION OF THE MAXIMUM ENTROPY PRINCIPLE TO WIND POWER INDUSTRY

Renewable energy sources have gained much attention due to the recent energy crisis and the urge to get clean energy. Wind energy is one of the important renewable energy resources. In the field of wind energy conversion, accurate determination of the probability distribution of wind speed ensures the efficient use of wind energy, thereby improving the position of wind power. The two-parameter Weibull function is most often used to describe such a distribution. However, for cases where the wind speed distribution by gradation has a character that is not typical for open areas, the accuracy of the Weibull function may not be sufficient.

The paper presents the results of mathematical modeling of wind potential and determination of wind power plant productivity based on the principle of maximum entropy using modern mathematical, statistical, and computer methods of calculation and analysis.

A method for applying the maximum entropy principle to describe the wind speed distribution function has been developed. It has been shown that the use of the Curve Fitting package of the Matlab system allows significantly simplifying and automating the process of determining the Lagrange multipliers. Optimal wind speed distribution functions obtained by the maximum entropy method for different numbers of moment functions are determined. The statistical characteristics of the developed distributions are compared with the Weibull distribution. It has been proven that the description of the specific power of the wind flow based on the maximum entropy method has the highest accuracy and better reflects the features of the experimental wind speed distribution.

Based on the obtained wind speed distributions, the wind energy potential of the area was determined. It was shown that the maximum entropy method gives the best agreement with the experimental data.

The use of the developed toolkit allows increasing the accuracy of mathematical modeling of wind speed distribution, and with it the accuracy of long-term forecasting of wind turbine electricity generation.

Key words: *wind energy power conversion, maximum entropy principle, distribution function, wind energy potential, Weibull distribution.*

Постановка проблеми

Вітер грає головну роль у багатьох сферах, таких як вітроенергетика, боротьба проти опустелювання, переносу і розповсюдження забруднюючих речовин. Внаслідок прямого зв'язку проблеми глобального потепління з традиційними системами перетворення енергії, на сьогодні відновлювальні джерела енергії, включаючи енергію вітру, стають все більш інтегрованими у глобальні системи генерації електроенергії. Енергія вітру є екологічно чистою та стійкою, однак, змінність та ймовірнісний характер енергії вітру створюють значні проблеми при експлуатації енергетичних систем. Щоб підтримувати якість мережевої генерації з використанням енергії вітру, швидкодіючі звичайні генератори повинні компенсувати коливання потужності, які викликані змінним характером енергії вітру [1–4]. Для цього необхідно надійно знати можливе вироблення енергії вітроенергетичною установкою (ВЕУ), оскільки неточне визначення потужностей може викликати додаткові економічні витрати або привести до ненадійного енергозабезпечення споживачів. Таким чином, знання імовірнісних характеристик швидкості вітру є важливим.

Вітровий потенціал певної місцевості може бути визначений статистичними методами. При такому описі необхідно знати функцію густини розподілу швидкості вітру як випадкової величини. Частіше для опису такого розподілу використовують двопараметричну функцію Вейбула. Проте для випадків, коли розподіл швидкості вітру по градаціях має нетиповий для відкритих місцевостей характер точності функції Вейбула буває недостатньо. В роботі [5] показано, що функція розподілу швидкості вітру може характеризуватися двома екстремумами, і розподіл Вейбула непридатний для її коректного опису.

Для визначення потенційної продуктивності конкретних вітроустановок важливим є точне знання питомої ваги великих та малих швидкостей, оскільки енергетична оцінка виражається кубічною залежністю і тому більш чутлива до швидкості вітру. Альтернативним підходом до вирішення задач опису функції розподілу швидкості вітру є використання принципу максимуму ентропії [4–6] як досить потужного, хоча й трудомісткого методу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Принцип максимуму ентропії широко використовується в різних областях: від статистичної і квантової механіки до теорії фінансового моделювання. Концепція принципу максимуму ентропії була вперше сформульована в роботі [7] таким чином, що для будь-якої доступної інформації про розподіл необхідно знайти найменш інформативний ймовірнісний розподіл, який має найбільший ступінь невизначеності, тобто максимальну ентропію.

В області відновлювальної енергетики принцип максимуму ентропії використовували для вибору місця розташування вітрових електростанцій [1], а також для оцінки енергетичного потенціалу вітру як альтернативу до функції розподілу Вейбула [5–8]. Запропоновано теоретичний метод обчислення функції густини ймовірності для розподілу швидкості вітру [9]. В цих дослідженнях вважали, що маса вітрового потоку зберігається, тобто сталими є маса рухомих молекул, момент імпульсу і енергія, що використовується для побудови сімейства розподілів, отриманих з принципу максимальної ентропії. Отримано функції розподілу для добових, місячних, сезонних та річних коливань швидкості вітру.

В роботі [10] досліджено погодинні дані швидкості вітру, які реєструвалися на метеорологічних станціях, розташованих на Канарах. Створено функцію розподілу ймовірності, яка ґрунтується на принципі максимуму ентропії. У даному дослідженні зроблено висновок про те, що функція на основі принципу максимуму ентропії дає найменшу відносну похибку при оцінюванні густини енергії вітру у порівнянні з функцією розподілу Вейбула.

Аналіз швидкості вітру з п'яти ділянок у Північній Дакоті (США) з використанням принципу максимуму ентропії представлено у роботі [11]. У цьому дослідженні крім розподілу на основі принципу максимуму ентропії, також розглянуті розподіли Вейбула, Релея, гама-розподіл, логарифмічний та обернений гаусівський розподіли. Зроблено висновок, що розподіл на основі принципу максимуму ентропії є більш гнучким у порівнянні з іншими розподілами.

В роботі [12] проведено дослідження швидкості вітру у районі припливної зони у Східнокитайському морі. Отримані дані швидкості вітру було описано за допомогою розподілу Вейбула та за допомогою принципу максимуму ентропії. Дослідження показало, що функція розподілу, яку отримано на основі принципу максимуму ентропії найкраще описує експериментальний розподіл швидкостей вітру. Проведене порівняння точності опису експериментального розподілу швидкості вітру для міста Baburband у Пакистані з використанням функції Вейбула і принципу максимуму ентропії також підтвердило переваги останнього [6].

Застосування принципу максимуму ентропії потребує значних та складних математичних обчислень у порівнянні з іншими методами, що можна вважати недоліком цього методу. Використовується метод Ньютона для розв'язку нелінійних $N + 1$ рівнянь з множниками Лагранжа, розширеного у вигляді ряду Тейлора. Для знаходження множників Лагранжа використовується ітераційний метод. Тому застосування методу максимуму ентропії у тому чи іншому випадку має бути обґрунтованим і доцільним. Також слід зауважити, що використання принципу максимуму ентропії для опису розподілу швидкості вітру не повністю вивчено для всіх діапазонів швидкостей.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження було доведення принциповою можливості автоматизації розрахунку множників Лагранжа з використанням пакету Curve Fitting в системі Matlab, що дозволить значно полегшити та прискорити розрахунки функції розподілу швидкостей вітру на основі принципу максимуму ентропії і зробити цей підхід більш доступним.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для швидкості вітру υ як випадкової величини, заданої на інтервалі (υ_{min}, υ_{max}) і яка описується певною функцією розподілу $f(\upsilon)$, ентропія визначається формулою [6, 8]:

$$H = -\int_{\upsilon_{min}}^{\upsilon_{max}} f(\upsilon)\ln(f(\upsilon))d\upsilon. \tag{1}$$

Для максимізації виразу (1) застосовується метод множників Лагранжа. Цей метод передбачає побудову допоміжного функціонала:

$$H = -\int_{\upsilon_{min}}^{\upsilon_{max}} f(\upsilon)\ln\left(f(\upsilon)\right)d\upsilon - \sum_{i=0}^{n}\lambda_i\left(\int_{\upsilon_{min}}^{\upsilon_{max}} g_i(\upsilon)f(\upsilon)d\upsilon - \mu_i\right), \tag{2}$$

де $g_i(\upsilon/\upsilon_c)$ – моментні або координатні функції, μ_i – моменти розподілу випадкової величини, υ_c – середня швидкість вітру, λ_i – множники Лагранжа, причому $g_0(\upsilon/\upsilon_c) = 1$, $\mu_0 = 1$.

Точка екстремуму допоміжного функціонала (2) забезпечує екстремум вихідного функціонала (1), розв'язком умови екстремуму є функція [6, 8]:

$$f(\upsilon) = A\exp\left(-\sum_{i=0}^{n}\lambda_i g_i(\upsilon)\right), \tag{3}$$

де константа A визначається з умови нормування $\int_{\upsilon_{min}}^{\upsilon_{max}} f(\upsilon)d\upsilon = 1$.

Множники Лагранжа λ_i, що входять до функції розподілу (3), знаходять з системи рівнянь (2), яка отримує вигляд [6]:

$$\int_{\upsilon_{min}}^{\upsilon_{max}} g_i(\upsilon)\exp\left(-\sum_{i=0}^{n}\lambda_i g_i(\upsilon)\right)d\upsilon = \mu_i \tag{4}$$

Маємо замкнену систему рівнянь відносно $n + 1$ невідомої. Основна складність методу максимальної ентропії полягає у неможливості точного розв'язку інтегральних рівнянь (4). Ці рівняння розв'язуються ітераційним методом и дозволяють визначити параметри функції розподілу швидкості вітру. Переважно використовується метод дотичних. Збіжність методу залежить від вдалого вибору нульового наближення, кроку ітерації, тобто загалом від

майстерності виконавця. У будь-якому випадку ітераційний метод розв'язку системи рівнянь (4) потребує значних розрахункових потужностей і часу. Моменти μ_i визначаються з досліджуваної вибірки значень випадкової величини, відповідно до обраних моментних функцій $g_i(\upsilon)$:

$$\mu_i = \sum_{\upsilon} g_i(\upsilon)\, p(\upsilon), \tag{5}$$

де $p(\upsilon)$ – дискретна повторюваність різних градацій швидкості вітру для досліджуваної географічної місцевості.

Підставляючи вираз (3) у (1), з урахуванням (4) для максимального значення ентропії маємо:

$$H_{\max} = \lambda_0 + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \mu_i. \tag{6}$$

Сучасний розвиток прикладних комп'ютерних програм дозволяє значно спростити процедуру розв'язку складних математичних задач. Запропонований нами метод отримання множників Лагранжа λ_i дозволяє взагалі не застосовувати складну процедуру ітераційних розрахунків. Для цього використовуються потужності пакету Curve Fitting системи Matlab, де можна апроксимувати функцією (3) набір експериментальних значень швидкості вітру. Значення множників λ_i обчислюються автоматично разом з похибками, але перед цим треба задати моментні функції $g_i(\upsilon)$. Як показують дослідження [8, 10], в якості моментних функцій доцільно використовувати ступеневі υ/υ_c, $(\upsilon/\upsilon_c)^2$ та логарифмічні $\ln(\upsilon/\upsilon_c)$, $\ln(1 + \upsilon/\upsilon_c)$, $\ln^2(\upsilon/\upsilon_c)$, $\ln(1 + (\upsilon/\upsilon_c)^2)$ функції. Кількість моментних обмежень при проведенні досліджень: $n = 2{,}4$. Середнє значення швидкості вітру υ_c визначається за формулою:

$$\upsilon_c = \sum_{\upsilon} p(\upsilon)\upsilon. \tag{7}$$

Можливості методу максимуму ентропії продемонстровано для тестового розподілу швидкостей вітру (див. табл. 1).

Таблиця 1

Дискретний розподіл швидкостей вітру та моменти розподілу

Розподіл швидкостей вітру								
υ, м/с	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5
$p(\upsilon)$	0.008	0.036	0.080	0.180	0.190	0.170	0.110	0.055
υ, м/с	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5
$p(\upsilon)$	0.046	0.030	0.012	0.020	0.025	0.011	0.019	0.008
Моменти розподілу для різних моментних функцій								
$g_i(\upsilon)$		1	υ/υ_c	$(\upsilon/\upsilon_c)^2$	$\ln(\upsilon/\upsilon_c)$	$\ln(1 + \upsilon/\upsilon_c)$	$\ln^2(\upsilon/\upsilon_c)$	$\ln(1 + (\upsilon/\upsilon_c)^2)$
μ_i		1	1	1.273	–0.132	0.663	0.303	0.689

При проведенні розрахунків інтегрування в рівняннях (4) виконується в певних межах ($\upsilon_{\min}$, $\upsilon_{\max}$). Строго кажучи, інтервал інтегрування у виразах типу (4) має становити $(-\infty, +\infty)$. Однак насправді швидкість вітру не буває від'ємною і обмежена у максимальних значеннях. Для досягнення кращої точності при апроксимації даних спостережень розрахунковий інтервал має гарантовано перекривати інтервал зміни фактичних даних, а поза ним значення вважаються нульовими, тобто функція розподілу матиме вигляд [8]:

$$f(\upsilon) = \begin{cases} 0, & \upsilon < \upsilon_{\min} \\ A\exp\left(-\sum_{i=0}^{n} \lambda_i g_i(\upsilon)\right) & \upsilon_{\min} \le \upsilon \le \upsilon_{\max} \\ 0, & \upsilon > \upsilon_{\max} \end{cases}. \tag{8}$$

При розрахунках було прийнято $\upsilon_{\min} = 0.1$ м/с, $\upsilon_{\max} = 15.5$ м/с, $\upsilon_c = 5.7$ м/с.

Запропонований в роботі метод отримання множників Лагранжа λ_i дозволяє уникнути складної процедури ітераційних розрахунків. Для цього використовуються потужності пакету Curve Fitting системи Matlab, де можна апроксимувати функцією (3) набір експериментальних значень швидкості вітру. Значення множників λ_i обчислюються автоматично разом з похибками.

У табл. 2 наведено результати розрахунку параметрів λ_i для деяких наборів моментних функцій, нормувальних констант A, а також максимальні значення ентропії $H_{\max}$, середньоквадратичні похибки апроксимації *RMSE* та коефіцієнти детермінації R^2 (кореляції).

Порівняння результатів розрахунків проводиться між різними функціями розподілу типу (8), а також з функціями дво- та трипараметричного розподілу Вейбула:

Таблиця 2

Параметри функцій розподілу для деяких наборів моментних функцій

№	$g_i(\upsilon/\upsilon_c)$	H_{max}	A	$RMSE$	R^2	к-ти апроксимації
1	υ/υ_c, $(\upsilon/\upsilon_c)^2$	1.995	1.136	0.017	0.941	$\lambda_0 = 4.915$; $\lambda_1 = -7.965$; $\lambda_2 = 4.849$
2	$\ln(\upsilon/\upsilon_c)$, $\ln^2(\upsilon/\upsilon_c)$	2.140	1.074	0.013	0.960	$\lambda_0 = 1.925$; $\lambda_1 = -1.776$; $\lambda_2 = 2.773$
3	$\ln^2(\upsilon/\upsilon_c)$, $\ln(1 + (\upsilon/\upsilon_c)^2)$	2.130	1.078	0.013	0.967	$\lambda_0 = 0.668$; $\lambda_1 = 2.087$; $\lambda_2 = 1.782$
4	υ/υ_c, $(\upsilon/\upsilon_c)^2$, $\ln(1 + (\upsilon/\upsilon_c)^2)$	2.259	1.023	0.010	0.980	$\lambda_0 = 9.064$; $\lambda_1 = -25.400$; $\lambda_2 = 1.993$; $\lambda_3 = 23.460$
5	υ/υ_c, $\ln^2(\upsilon/\upsilon_c)$, $\ln(1 + (\upsilon/\upsilon_c)^2)$	2.235	1.038	0.012	0.974	$\lambda_0 = 2.825$; $\lambda_1 = -7.450$; $\lambda_2 = 1.836$; $\lambda_3 = 9.455$
6	υ/υ_c, $(\upsilon/\upsilon_c)^2$, $\ln(\upsilon/\upsilon_c)$	2.217	1.048	0.012	0.963	$\lambda_0 = -1.271$; $\lambda_1 = 4.451$; $\lambda_2 = -1.251$; $\lambda_3 = 3.019$
7	υ/υ_c, $(\upsilon/\upsilon_c)^2$, $\ln(\upsilon/\upsilon_c)$, $\ln^2(\upsilon/\upsilon_c)$	0.179	0.029	0.009	0.983	$\lambda_0 = -28.020$; $\lambda_1 = 34.400$; $\lambda_2 = -4.487$; $\lambda_3 = -23.490$; $\lambda_4 = -4.646$
8	υ/υ_c, $(\upsilon/\upsilon_c)^2$, $\ln(\upsilon/\upsilon_c)$, $\ln(1 + \upsilon/\upsilon_c)$	2.245	1.031	0.010	0.982	$\lambda_0 = 11.170$; $\lambda_1 = 56.580$; $\lambda_2 = -6.851$; $\lambda_3 = 1.603$; $\lambda_4 = -85.170$
9	υ/υ_c, $(\upsilon/\upsilon_c)^2$, $\ln^2(\upsilon/\upsilon_c)$, $\ln(1 + (\upsilon/\upsilon_c)^2)$	2.052	0.888	0.009	0.984	$\lambda_0 = 12.130$; $\lambda_1 = -34.360$; $\lambda_2 = 2.918$; $\lambda_3 = -0.821$; $\lambda_4 = 30.630$
10	Двопараметричний розподіл Вейбула	–	–	0.018	0.923	$\gamma = 2.363$; $\beta = 5.511$
11	Трипараметричний розподіл Вейбула	–	–	0.016	0.946	$\gamma = 1.777$; $\beta = 4.149$; $\theta = 1.327$

$$f_{2W}(\upsilon) = \frac{\gamma}{\beta}\left(\frac{\upsilon}{\beta}\right)^{\gamma-1} \exp\left(-\left(\frac{\upsilon}{\beta}\right)^{\gamma}\right); \quad f_{3W}(\upsilon) = \frac{\gamma}{\beta}\left(\frac{\upsilon-\theta}{\beta}\right)^{\gamma-1} \exp\left(-\left(\frac{\upsilon-\theta}{\beta}\right)^{\gamma}\right). \tag{9}$$

Параметри H_{max} і R^2 потребують максимізації, параметр $RMSE$ – мінімізації. Як видно з аналізу отриманих даних (табл. 3), найбільше значення ентропії забезпечують комбінації трьох моментних функцій № 4, середньоквадратична похибка апроксимації $RMSE$ має найменше значення для функцій №7, 9, а коефіцієнт детермінації R^2 має найбільше значення для функції № 9. Остаточний вибір параметрів функції розподілу може здійснюватися відповідно до обраного критерію, проте досліджуваний метод базується саме на показнику ентропії. Тому оптимальним за набором критеріїв можна вважати варіант №4, і функція розподілу для даного набору вимірів матиме вигляд:

$$f(\upsilon) = 1.023\exp\left(-9.064 + 25.400\frac{\upsilon}{\upsilon_c} - 1.993\left(\frac{\upsilon}{\upsilon_c}\right)^2 - 23.460\ln\left(1+\left(\frac{\upsilon}{\upsilon_c}\right)^2\right)\right), \tag{10}$$

де інтервал зміни швидкості вітру $0.1 \le \upsilon \le 15.5$ м/с.

На рис. 1 показано графічне співставлення кривих розподілу швидкості вітру, отриманих на підставі методу максимуму ентропії та розподілів Вейбула. Всі розподіли було застосовано до експериментального розподілу швидкостей вітру (гістограма на рис. 1), який характеризується декількома локальними екстремумами: основним на швидкості вітру 4.5 м/с і додатковими на швидкостях вітру 12.5 і 14.5 м/с. З рис. 1 чітко видно, що метод

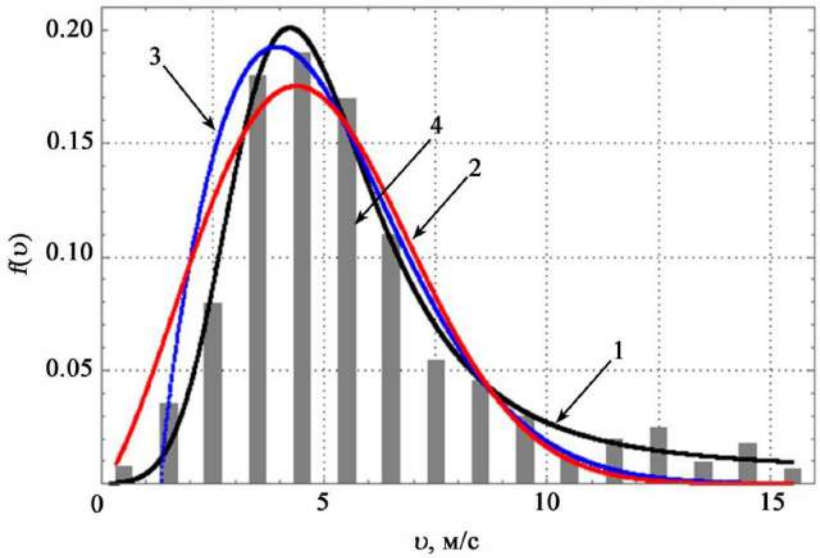


Рис. 1. Порівняння тестового дискретного розподілу швидкості вітру і неперервних функцій розподілу: 1) оптимальна функція розподілу, отримана на підставі принципу максимуму ентропії, 2) двопараметричний розподіл Вейбула, 3) трипараметричний розподіл Вейбула, 4) гістограма експериментального розподілу

максимуму ентропії краще описує експериментальні дані в усьому діапазоні їх зміни, що також підтверджується даними табл. 1.

Розподіл потужності вітру, віднесеної до одиниці площі поперечного перерізу вітрового потоку (питомої потужності), описується функцією:

$$\varepsilon(\upsilon) = \frac{1}{2}\rho\upsilon^3 f(\upsilon), \tag{11}$$

де $\rho = 1.226$ кг/м^3 – густина повітря.

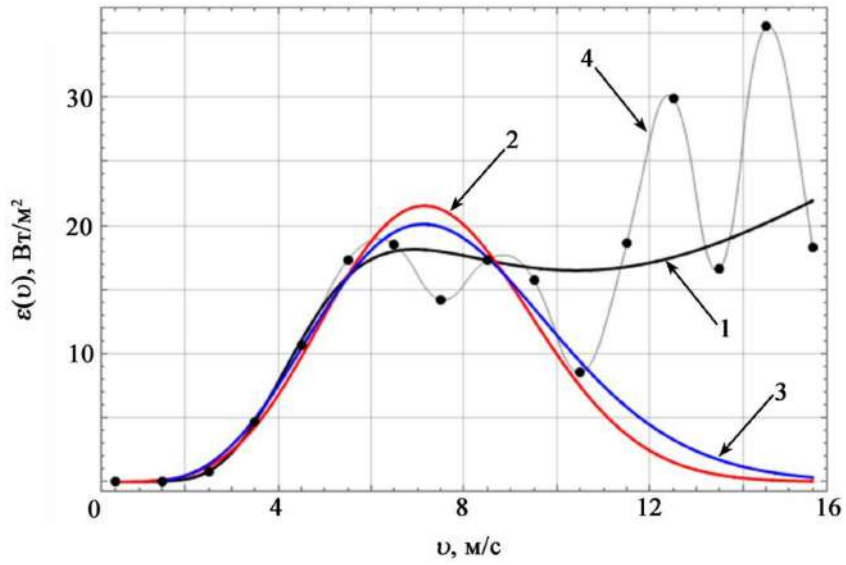


Рис. 2. Моделювання питомої потужності вітрового потоку за допомогою різних функцій розподілу: 1) оптимальна функція розподілу, отримана на підставі принципу максимуму ентропії, 2) двопараметричний розподіл Вейбула, 3) трипараметричний розподіл Вейбула, 4) експериментальний розподіл

Приклад цієї залежності для досліджуваних вимірів зображено на рис. 2 у вигляді точок, з'єднаних суцільною лінією. Видно, що для швидкостей вітру $\upsilon > 11$ м/с спостерігаються значні коливання із загально зростаючим трендом, який відтворюється функцією розподілу, отриманою з використанням принципу максимуму ентропії і зовсім не відображається розподілами Вейбула. У табл. 3 наведено порівняння точності різних функцій розподілу для опису питомої потужності вітру. Як бачимо, використання методу максимуму ентропії значно краще, ніж за іншими розподілами, моделює фактичний розподіл потужності вітру.

Таблиця 3

Порівняння функцій розподілу для опису питомої потужності вітру

Розподіл	Точність	
	***RMSE*, Вт/м²**	***R*²**
Вейбула (двопараметричний)	13.548	–1.221
Вейбула (трипараметричний)	13.316	–1.706
максимум ентропії (оптимальна)	6.398	0.537

Слід зазначити, що для розподілів Вейбула спостерігається від'ємний коефіцієнт детермінації, що свідчить про їх неспроможність адекватно описувати експериментальний розподіл питомої потужності вітру.

Висновки

Розроблено методику застосування принципу максимуму ентропії для опису функції розподілу швидкості вітру. Показано, що застосування пакету Curve Fitting системи Matlab дозволяє значно спростити та автоматизувати процес визначення множників Лагранжа. Запропоновано методику вибору оптимальної функції розподілу на основі багатокритеріального аналізу. Показано, що використання методу максимуму ентропії значно краще моделює фактичний розподіл потужності вітру ніж розподіл Вейбула.

Список використаної літератури

1. Unal M., Cilek A., Tekin S. (2024) Maximum Entropy Method for Wind Farm Site Selection: Implications for River Basin Ecosystems Under Climate Change. *Water*, 16(24), 3679. https://doi.org/10.3390/w16243679
2. Vrakopoulou M., Margellos K., Lygeros J. and Andersson G. (2013) A Probabilistic Framework for Reserve Scheduling and N-1 Security Assessment of Systems With High Wind Power Penetration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(4), pp. 3885–3896. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2272546
3. Yuan X. (2013) Overview of problems in large-scale wind integrations. *J Mod Power Syst Clean Energy*, 1(1), pp. 22–25. https://doi.org/10.1007/s40565-013-0010-6
4. Bian Q., Qiu Y., Wu W., Xin H. and Fu X. (2018) Generation dispatch method based on maximum entropy principle for power systems with high penetration of wind power. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 6(6), pp. 1213–1222. https://doi.org/10.1007/s40565-018-0419-z
5. Liu, F. J., Chang, T. P. (2011) Validity analysis of maximum entropy distribution based on different moment constraints for wind energy assessment. *Energy*, 36(3), pp. 1820–1826. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.11.033
6. Shoaib M., Siddiqui I., Rehman Sh., Rehman S., Khan S., Lashin A. (2016) Comparison of Wind Energy Generation Using the Maximum Entropy Principle and the Weibull Distribution Function. *Energies*, 9(842), pp. 1–8. I. https://doi.org/10.3390/en9100842
7. Jaynes E. T. (1968) Prior Probabilities. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(3), pp. 227–241.
8. Шарко О. В., Степанчиков Д. М., Шарко А. О. (2024) Термодинамічний підхід при математичному моделюванні вітрового потенціалу місцевості. зб. тез доп. XVI міжнародної науково-практичної конференції *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2024: (м. Одеса, 29–31 травня, 2024р.)*, Одеса, ХДМА, 2024. – с. 268–271.
9. Li, M.; Li, X. (2005) MEP-type distribution function: A better alternative to Weibull function for wind speed distribution. *Renew. Energy*, 30, pp. 1221–1240. https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.10.003
10. Ramírez, P.; Carta, J. A. (2006) The use of wind probability distributions derived from the maximum entropy principle in the analysis of wind energy. A case study. *Energy Convers. Manag*., 47, pp. 2564–2577. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.10.027
11. Zhou, J.; Erdem, E.; Li, G.; Shi, J. (2010) Comprehensive evaluation of wind speed distribution models: A case study for North Dakota sites. *Energy Convers. Manag*., 51, pp. 1449–1458. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.020
12. Zhang, H.; Yu, Y. J.; Liu, Z. Y. (2014) Study on the Maximum Entropy Principle applied to the annual wind speed probability distribution: A case study for observations of intertidal zone anemometer towers of Rudong in East China Sea. *Appl. Energy*, 114, pp. 931–938. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.040

References

1. Unal M., Cilek A., Tekin S. (2024) Maximum Entropy Method for Wind Farm Site Selection: Implications for River Basin Ecosystems Under Climate Change. *Water*, 16(24), 3679. https://doi.org/10.3390/w16243679
2. Vrakopoulou M., Margellos K., Lygeros J. and Andersson G. (2013) A Probabilistic Framework for Reserve Scheduling and N-1 Security Assessment of Systems With High Wind Power Penetration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(4), pp. 3885–3896. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2272546
3. Yuan X. (2013) Overview of problems in large-scale wind integrations. *J Mod Power Syst Clean Energy*, 1(1), pp. 22–25. https://doi.org/10.1007/s40565-013-0010-6
4. Bian Q., Qiu Y., Wu W., Xin H. and Fu X. (2018) Generation dispatch method based on maximum entropy principle for power systems with high penetration of wind power. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 6(6), pp. 1213–1222. https://doi.org/10.1007/s40565-018-0419-z
5. Liu, F. J., Chang, T. P. (2011) Validity analysis of maximum entropy distribution based on different moment constraints for wind energy assessment. *Energy*, 36(3), pp. 1820–1826. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.11.033
6. Shoaib M., Siddiqui I., Rehman Sh., Rehman S., Khan S., Lashin A. (2016) Comparison of Wind Energy Generation Using the Maximum Entropy Principle and the Weibull Distribution Function. *Energies*, 9(842), pp. 1–8. I. https://doi.org/10.3390/en9100842
7. Jaynes E. T. (1968) Prior Probabilities. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(3), pp. 227–241.
8. Sharko O. V., Stepanchikov D. M., Movchan P.V. (2024) Thermodynamic approach to mathematical modeling of the wind potential of a terrain. Proceedings of the *Modern Information and Innovation Technologies in Transport MINTT-2024*: *XVI international scientific and practical conference (Odesa, May 29–31, 2024)*. Odesa : Kherson State Maritime Academy, 2024, pp. 268–271.
9. Li, M.; Li, X. (2005) MEP-type distribution function: A better alternative to Weibull function for wind speed distribution. *Renew. Energy*, 30, pp. 1221–1240. https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.10.003

10. Ramírez, P.; Carta, J.A. (2006) The use of wind probability distributions derived from the maximum entropy principle in the analysis of wind energy. A case study. *Energy Convers. Manag*., 47, pp. 2564–2577. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.10.027

11. Zhou, J.; Erdem, E.; Li, G.; Shi, J. (2010) Comprehensive evaluation of wind speed distribution models: A case study for North Dakota sites. *Energy Convers. Manag*., 51, pp. 1449–1458. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.020

12. Zhang, H.; Yu, Y. J.; Liu, Z. Y. (2014) Study on the Maximum Entropy Principle applied to the annual wind speed probability distribution: A case study for observations of intertidal zone anemometer towers of Rudong in East China Sea. *Appl. Energy*, 114, pp. 931–938. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.040

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 17.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

UDC 678.057.33 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.34

YE. V. TRACHUK
Postgraduate Student at the Department of Machines and Apparatus
of Chemical and Oil Refining Industries
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0009-0006-1802-2058

M. P. SHVED
Ph.D., Associate Professor at the Department of Machines and Apparatus
of Chemical and Oil Refining Industries
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0001-7725-1447

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF POLYMER MELT VISCOELASTIC PROPERTIES ON THE MIXING QUALITY IN A DISK EXTRUDER CALCULATION

The amount of virgin plastic produced is increasing every year. At the same time, to meet modern requirements, polymers are modified with various additives forming composite polymer materials. The production of this type of materials requires the use of equipment capable of ensuring high-quality mixing of components within a wide range of properties. One way to meet these requirements is to use cascade extrusion systems, in which a screw-disk extruder is used as a melter and homogenizer [1–2].

The article discusses the influence of the viscoelastic properties of polymer melt in modeling the mixing process in disc extruders, which is key to achieving homogeneous and isotropic composite materials. A Newtonian fluid model, which ignores the viscoelastic properties of the material, can be used to determine velocity fields and productivity during extrusion. However, its limitations lead to inaccurate predictions in cases where the material exhibits viscoelastic properties.

To overcome these shortcomings, a second-order rheological model can be used, which describes both the viscous and elastic properties of the material. Using numerical modeling, a comparison was made between the results obtained using the Newtonian fluid model and the modified second-order rheological equation in the Rivlin-Ericksen formulation. The results showed that when viscoelastic effects are taken into account, the radial flow velocity increases, and the value of the shear strain caused by this component decreases. The values of the shear strain caused by the tangential velocity do not depend on the magnitude of the radial velocity. The total shear strain when using different fluid models remained virtually unchanged: 1719,2 units for the Newtonian fluid model and 1695 units for the second-order model. Thus, the difference between the calculation results is 1,38 %, which is not significant for this indicator.

Key words: *extrusion, disk extruder, clearance between disks, shear rate, shear strain, melt quality.*

Є. В. ТРАЧУК
аспірант кафедри машин та апаратів хімічних
і нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0006-1802-2058

М. П. ШВЕД
кандидат технічних наук,
доцент кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-7725-1447

АНАЛІЗ ВПЛИВУ В'ЯЗКОПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОЗПЛАВУ ПОЛІМЕРУ ПРИ РОЗРАХУНКУ ЯКОСТІ ЗМІШУВАННЯ У ДИСКОВОМУ ЕКСТРУДЕРІ

Кількість первинного пластику, що виготовляється, збільшується з кожним роком. При цьому для забезпечення сучасних вимог полімери модифікують різними добавками, таким чином утворюючи композиційні полімерні матеріали. Виготовлення даного типу сировини потребує використання обладнання здатного

© Trachuk Ye. V., Shved M. P., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

забезпечувати високу якість змішування компонентів у широких межах властивостей. Одним зі шляхів виконання таких вимог є використання каскадних екструзійних систем, в яких, у якості розплавлювача-гомогенізатора, використовується черв'ячно-дисковий екструдер [1–2].

У статті розглянуто вплив в'язкопружних властивостей розплаву полімеру при моделюванні процесу змішування в дискових екструдерах, який є ключовим для досягнення однорідних та ізотропних композитних матеріалів. Модель ньютонівської рідини, що ігнорує в'язкопружні властивості матеріалу, може використовуватись для визначення полів швидкостей та продуктивності при екструзії. Проте її обмеження призводять до неточних прогнозів у випадках, коли матеріал проявляє в'язкопружні властивості.

Для подолання цих недоліків може використовуватись реологічна модель другого порядку, яка описує як в'язкісні, так і еластичні властивості матеріалу. За допомогою чисельного моделювання виконано порівняння результатів отриманих за моделлю ньютонівської рідини та модифікованим реологічним рівнянням другого порядку у формулюванні Рівліна-Еріксена. Результати показали, що при врахуванні в'язкопружних ефектів радіальна швидкість потоку швидкості зростає, а значення накопиченої деформації, спричиненої цією компонентною, зменшується. Значення накопиченої деформації, спричиненої тангенціальною швидкістю, не залежать від величини радіальної швидкості. Загальна накопичена деформація зсуву при застосуванні різних моделей рідини залишилася практично незмінною: 1719,2 одиниць для моделі ньютонівської рідини і 1695 одиниць для моделі другого порядку. Таким чином, різниця між результатами розрахунків складає 1,38 %, що не є значущим для цього показника.

Ключові слова: *екструзія, дисковий екструдер, зазор між дисками, швидкість деформації зсуву, деформація зсуву, якість розплаву.*

Problem statement

Due to their special operational characteristics, the availability of effective processing methods, and the existence of significant reserves of raw materials, polymers are used in almost every sector of the economy [3]. As a result, there has been a gradual increase in the mass of primary polymers worldwide, and there are currently no signs that this trend will stop in the near future [3–5].

To meet modern requirements for polymer products, polymers are modified using various fillers, additives, and dyes, creating composite materials with unique combinations of characteristics. The mixing process plays a special role in the manufacture of composite materials. The uniformity of the distribution of components in the melt and, accordingly, the repeatability and isotropy of the characteristics of the resulting material depend on the quality of the mixing of the polymer with additives.

Although single- and twin-screw extruders are quite versatile, they are physically incapable of processing different materials equally well, especially those with different fillers. In this regard, cascade extrusion units are becoming more and more popular. They are more flexible because in such units, different operations are performed not by a single working body (screw) with a fixed geometry, but by different machines with the possibility of autonomous control.

In cascade schemes for the production of filled compositions and polymer granulation, screw-disk extruder is particularly effective as melter and homogenizer (Fig. 1). These extruders are simple to manufacture, compact, and versatile [1]. Of particular interest is the ability to regulate and predict the degree of homogeneity of the melt at the outlet of the screw-disk extruder [6], since in cascade installations it is mainly used as a melter and homogenizer.

Despite the fact that disk extruders have been studied since the 1950s, there is currently no methodology that would allow quantitative assessment and prediction of melt homogenization quality depending on the technological parameters of the extrusion process. This significantly complicates both the optimization of equipment designs and the selection of rational technological modes for its operation.

Analysis of the latest research and publications

One of the most convenient methods for assessing the quality of melt homogenization is to determine the average thickness of the material strips. Since polymer melts are characterized by high viscosity, their movement occurs in laminar mode [7], and mixing is caused by shear strain. In simple shear, the thickness of the strip is related to shear strain as follows [7]:

$$\frac{r}{r_0} = \frac{1}{\sqrt{1+\gamma^2}} = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{dV}{dS}t\right)^2}}, \tag{1}$$

where dV/dS – the coordinate-derivative of velocity, t – shear strain duration.

Thus, knowledge of the material flow velocity fields is a prerequisite for determining the mixing effect in the clearance of a disk extruder. Two velocity components are usually considered: radial and tangential, Fig. 2. The radial component determines the productivity of the extruder, while the tangential component is decisive in calculating the mixing capacity of the disk extruder.

Since the description of the disk extruder, many authors have attempted to theoretically justify the material flow processes that occur in the working clearance. Tomita and Kato [8] were among the first, who obtained the following

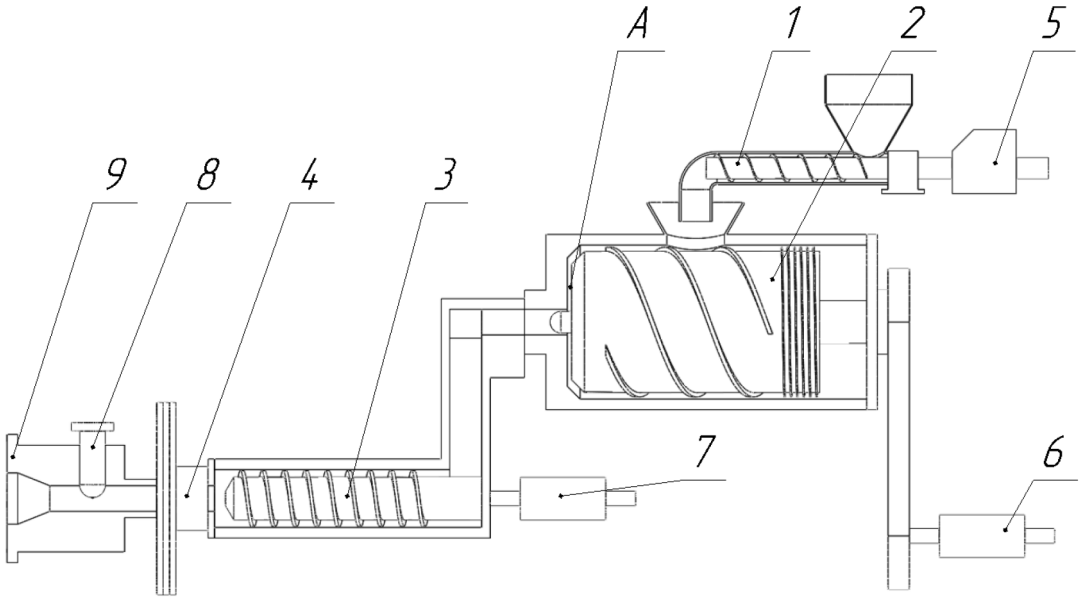


Fig. 1. Diagram of a cascade screw-disk extruder
(1 – screw feeder; 2 – screw-disk extruder; 3 – screw extruder; 4 – filter; 5, 6, 7 – drives of the rotating parts of the cascade extruder; 8 – throttling device; 9 – forming tool)

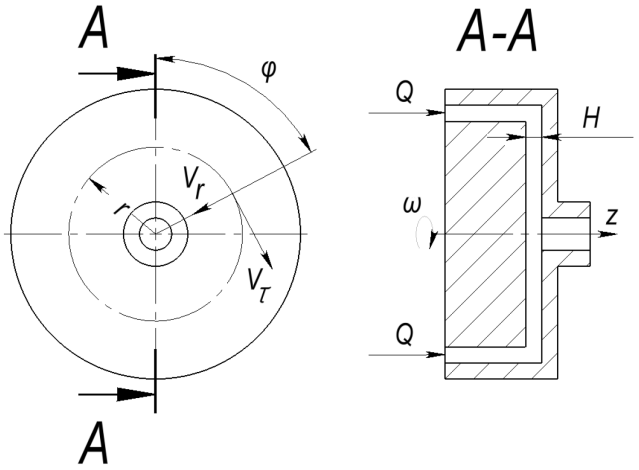


Fig. 2. Diagram of the clearance between the disks

equation for the radial component, using the assumption of a linear dependence of the tangential velocity on the coordinate across the width of the clearance:

$$V_r = \frac{3Q}{\pi r H^3}\left(z^2 - Hz\right), \tag{2}$$

where H – clearance between the disks, r, z – coordinates on the corresponding axes, Q – extruder volumetric productivity.

Equation 2 does not take into account the influence of the viscoelastic properties of the polymer melt. This result is rather questionable, since it is known that normal stress effects occur during the processing of polymers in disk extruders [9]. This causes the radial velocity and, accordingly, the productivity of the apparatus to depend on the rotation frequency of the moving disk. Nevertheless, many researchers use this dependence when developing mathematical models and simulating disk extruders [1, 10–12].

The obtained results allow us to describe the general trends in melt flow, but their accuracy remains limited due to the neglect of the viscoelastic properties of polymer materials. Considering the key role of these properties in the formation of velocity fields, further development of disk extruder models is impossible without taking into account the rheological characteristics of polymer melts.

The study aims

The purpose of this work is to compare the velocity fields of polymer melt in a clearance between the disks of a screw-disk extruder and the amount of shear strain using a Newtonian fluid model and a viscoelastic fluid model, which is described by a modified second-order rheological equation in the Rivlin-Ericksen formulation.

Main research material

In a disk extruder, two mutually perpendicular velocity components are at work: tangential and radial. Taking this into account, for a disk extruder, it is necessary to modify formula 1 for the case of a two-axis simple shear:

$$\frac{r}{r_0}=\frac{1}{\theta_к\cdot\left(1+\sqrt{1+\gamma_r^2}+\sqrt{1+\gamma_\tau^2}\right)}. \tag{3}$$

It is known that during extrusion, shear deformations are much greater than unity. Then equation 3 can be simplified to the form

$$\frac{r}{r_0}=\frac{1}{\theta_к\cdot\left(\gamma_r+\gamma_\tau\right)}=\frac{1}{\theta_к\cdot\left(\dot{\gamma}_r t+\dot{\gamma}_\tau t\right)}. \tag{4}$$

In a disk extruder, the most significant change of the parameters is in the channel width direction. Therefore, the derivatives of the greatest importance are $\dot{\gamma}_r=dV_r/dz$ and $\dot{\gamma}_\tau=dV_\tau/dz$.

In works [13–15], the movement of polymer in the clearance between disks of a disk extruder was analyzed using a modified second-order rheological equation in the Rivlin-Ericksen formulation. For the case of the combined action of disc rotation and screw thread pressure, the following equations were obtained to determine the pressure distribution along the disk radius, as well as the tangential and radial velocity components:

$$V_r=\frac{1}{r}\cdot\left[\frac{K_2}{K_1}\cdot r\cdot g1+\frac{r^{(2-n)}\cdot g1^{(1-n)}}{K_1\cdot}\cdot\frac{dP}{dr}\right]\cdot\frac{H^2}{8}\cdot\left[\left(\frac{2\cdot z}{H}\right)^2-1\right]+\left|\frac{1}{K_1}\cdot\frac{dP}{dr}\right|^{\frac{1}{n}}\cdot\frac{n}{n+1}\cdot\left(\frac{H}{2}\right)^{(1+n)/n}\cdot\left[\left|\frac{2\cdot z}{H}\right|^2-1\right]; \tag{5}$$

$$V_\tau=\frac{2\cdot\pi\cdot\omega}{H}\cdot z. \tag{6}$$

A linear dependence was used to describe the tangential component, as it was determined that this simplifies the mathematical model and does not lead to significant deviations in the performance calculation results [15].

The pressure gradient *dP*/*dr* is determined from the equation

$$2\cdot\pi\cdot\int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}}\left(\left[\frac{K_2}{K_1}\cdot r\cdot g1+\frac{r^{(2-n)}\cdot g1^{(1-n)}}{K_1\cdot}\cdot\frac{dP}{dr}\right]\cdot\frac{H^2}{8}\cdot\left[\left(\frac{2\cdot z}{H}\right)^2-1\right]+r\cdot\left|\frac{1}{K_1}\cdot\frac{dP}{dr}\right|^{\frac{1}{n}}\cdot\frac{n}{n+1}\cdot\left(\frac{H}{2}\right)^{(1+n)/n}\cdot\left[\left|\frac{2\cdot z}{H}\right|^2-1\right]\right)zd+$$
$$+Q-2\cdot\pi\cdot\int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}}\frac{K_2\cdot g1\cdot H^2\cdot r}{8\cdot K_1}\cdot\left[\left|\frac{2\cdot z}{H}\right|^2-1\right]dz=0. \tag{7}$$

When modeling extrusion processes, a stepwise approximation method is often a pretty effective approach. Its essence lies in the fact that the extrusion process is presented as a set of sequentially arranged small volumetric elements, within which certain parameters are considered constant, while their change occurs abruptly at the boundaries between these elements [12].

The flow process in a clearance between disks is an axisymmetric process. With this in mind, it is advisable to divide the working volume into strips of thickness ***dr***, which in turn are divided into elements of thickness ***dr*** and width ***dz***, Fig. 3.

In the case of the accepted calculation scheme, the productivity of each strip with a thickness of *dr* is the same and equals *Q*. Then the productivity of each element with a thickness of *dr* and a width of *dz* is determined by the equation

$$\Delta Q_i=2\cdot\pi\cdot R_i\cdot dz\cdot V_{ri}. \tag{8}$$

The time the material spends under the conditions prevailing inside the element is calculated using the following equation:

$$t_i=\frac{dr}{V_{ri}}. \tag{9}$$

According to the no-slip boundary condition, the velocity of the material on the walls is assumed to be zero. Thus, in virtually any continuous mixer, the material at the walls undergoes significantly greater deformation than the material in the central areas of the flow, Fig. 5 [7].

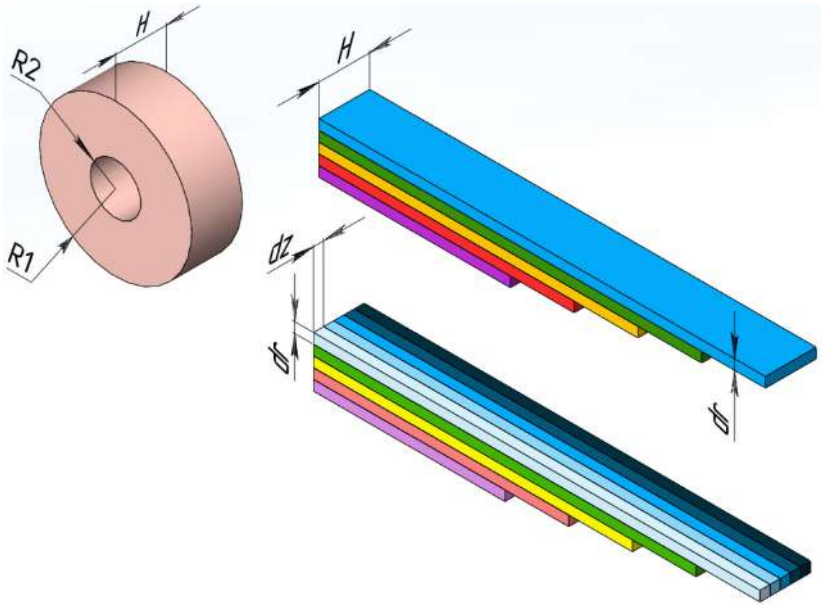


Fig. 3. Diagram of the division of a clearance between disks into calculation elements

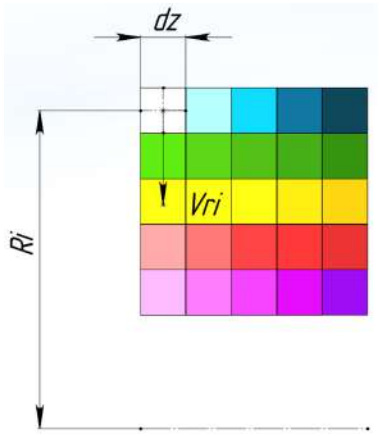


Fig. 4. Diagram for determining parameters inside a calculation element

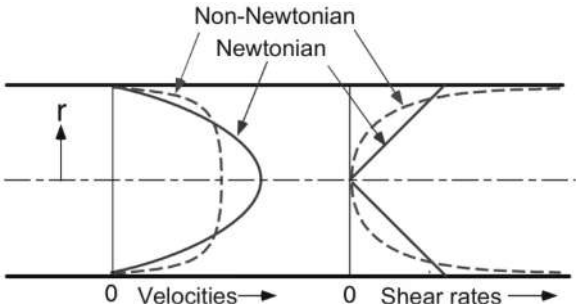


Fig. 5. Velocity and shear rate profiles in a pressurized flow through a straight channel [7]

However, due to their low speed, the layers near the walls are characterized by low productivity and therefore have a negligible effect on the overall mixing quality in the extruder. Therefore, the average shear deformation of the material should be calculated not as an arithmetic mean, but using the equation

$$\gamma_{cp} = \sum_i \frac{\Delta Q_i \cdot \gamma_i}{Q}. \tag{10}$$

Based on the described dependencies, the program was developed using Python. It is capable of calculating the amount of shear strain which the material gets when passing through the clearance between the disks of the disk extruder.

This allows predicting the quality of material mixing at the outlet of the disk extruder, taking into account the viscoelastic properties of the material, the geometric characteristics of the clearance, the productivity of the screw thread, and the disk rotation frequency. By substituting different equations to determine the velocity components, it is possible to compare the velocity fields when using both the Newtonian fluid model and the viscoelastic fluid model, which is described by a modified second-order rheological equation in the Rivlin-Ericksen formulation.

The parameters were determined using the following initial data: clearance width H – 0,006 m, outer radius R_1 – 0,15 m, inner radius R_2 – 0,09 m, rotation frequency ω – 3 s^{-1}, number of calculation points along the R axis – 50, number of calculation points along the z axis – 50, productivity Q – $6{,}184 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s}$. Polystyrene with the following characteristics was taken as the test material: $n = 0{,}31$; $K_1 = 1{,}73 \cdot 10^4$ Pa · s^n; $K_2 = 1{,}77 \cdot 10^4$ Pa · s^n; $K_3 = 1{,}64 \cdot 10^4$ Pa · s^n.

Calculations showed that the flow velocity in the radial direction, taking into account viscoelastic properties, is greater than in the Newtonian fluid model, Fig. 6. This is explained by the consideration of the normal stress effect, which additionally directs the material towards the axis of rotation.

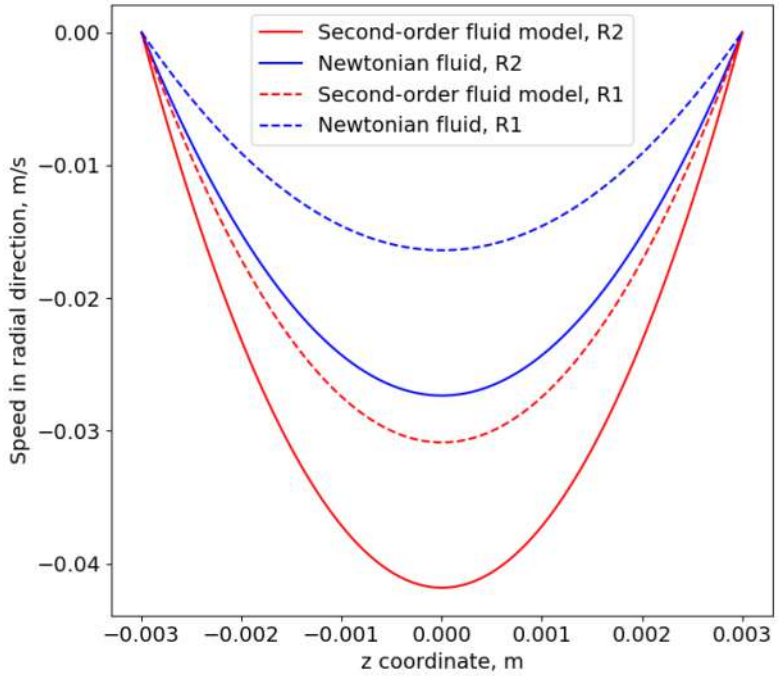


Fig. 6. Velocity profiles in the radial direction

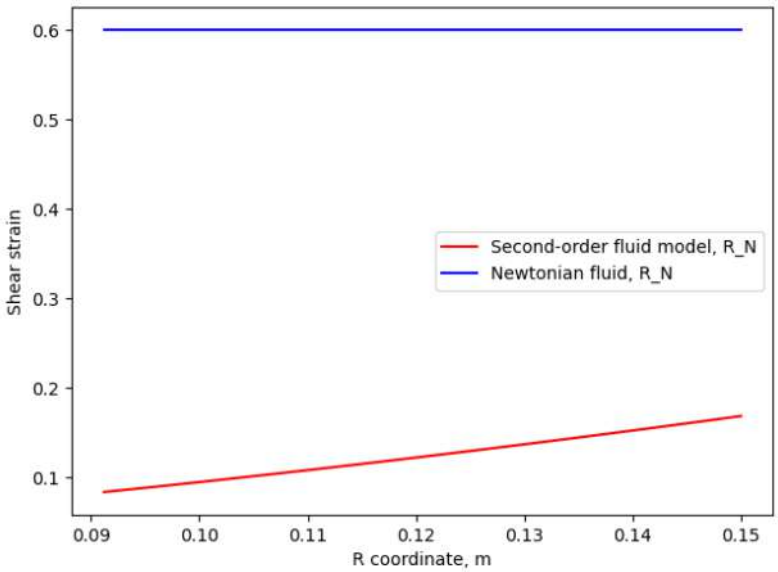


Fig. 7. Dependence of the magnitude of the radial velocity component shear deformation on the radius

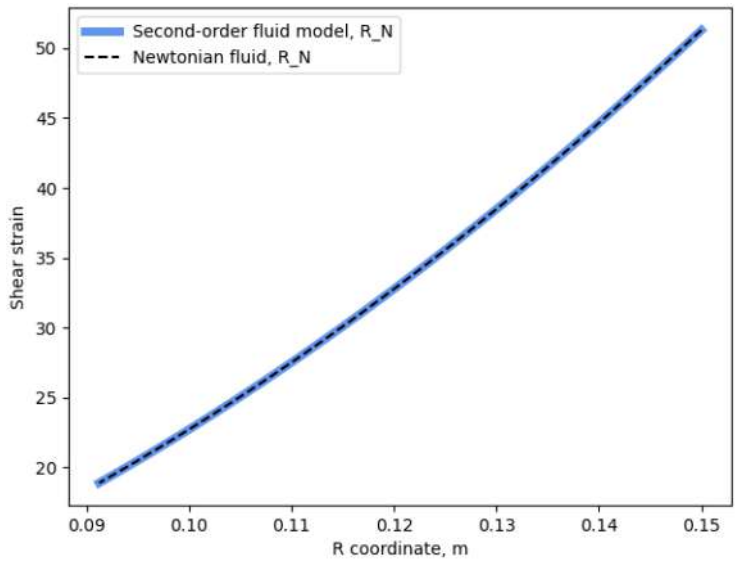


Fig. 8. Dependence of the magnitude of shear deformation of the tangential velocity component on the radius

The nature of the dependence of the shear deformation of the radial velocity component on the radius when using both models differs greatly. As can be seen in Figure 7, when using the Newtonian fluid model, the shear deformation does not depend on the radius value and is equal to a certain constant. It has been determined that this value depends on the step size ΔR and is described by the equation

$$\gamma_r = \sum_i \frac{\Delta Q_i \cdot \gamma_{ri}}{Q} = \sum_i \sum_j \frac{6 \cdot (H - 2 \cdot z) \cdot \Delta R_i}{H^3} \Delta z_j . \tag{11}$$

Since both models use the same equations for the tangential velocity component, the values of shear deformation caused by this component are identical (Fig. 8). At first glance, this result seems counterintuitive, since the radial velocities are not equal, which means that the time during which the material perceives shear rate also differs. However, the independence of the shear strain in the radial direction from the value of the radial velocity component becomes obvious upon detailed consideration of the equation for determining the shear strain in the tangential direction.

$$\gamma_\tau = \sum_i \frac{\Delta Q_i \cdot \gamma_{\tau i}}{Q} = \sum_i \frac{\Delta Q_i \cdot \dot{\gamma}_{ik} \cdot t}{Q} = \sum_i \sum_j \frac{(2 \cdot \pi \cdot R_i \cdot \Delta z_j \cdot V_{ri}) \cdot \dot{\gamma}_{ik} \cdot \left(\frac{\Delta R}{V_{ri}} \right)}{Q} = \sum_i \sum_j \frac{2 \cdot \pi \cdot R_i \cdot \Delta z_j \cdot \dot{\gamma}_{ik} \cdot \Delta R}{Q} . \tag{12}$$

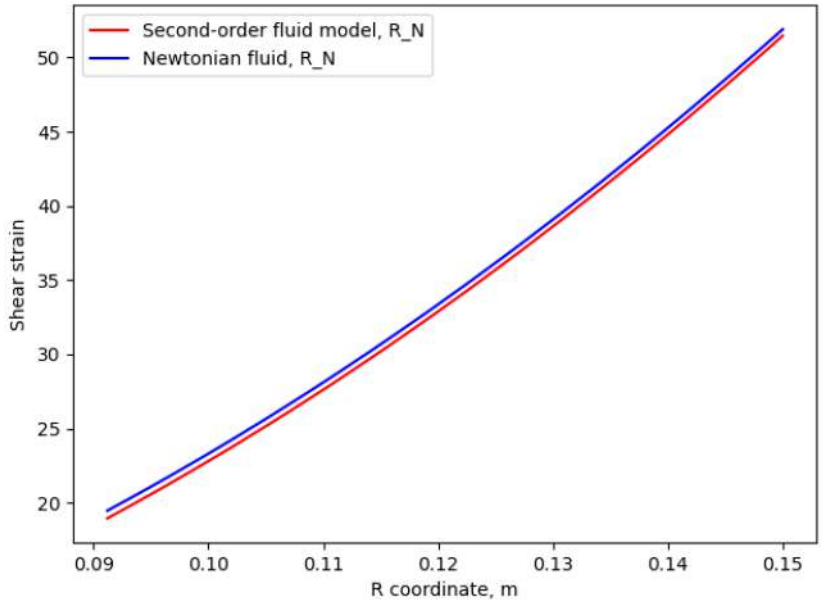


Fig. 9. Dependence of the magnitude of the radial velocity component shear strain on the radius

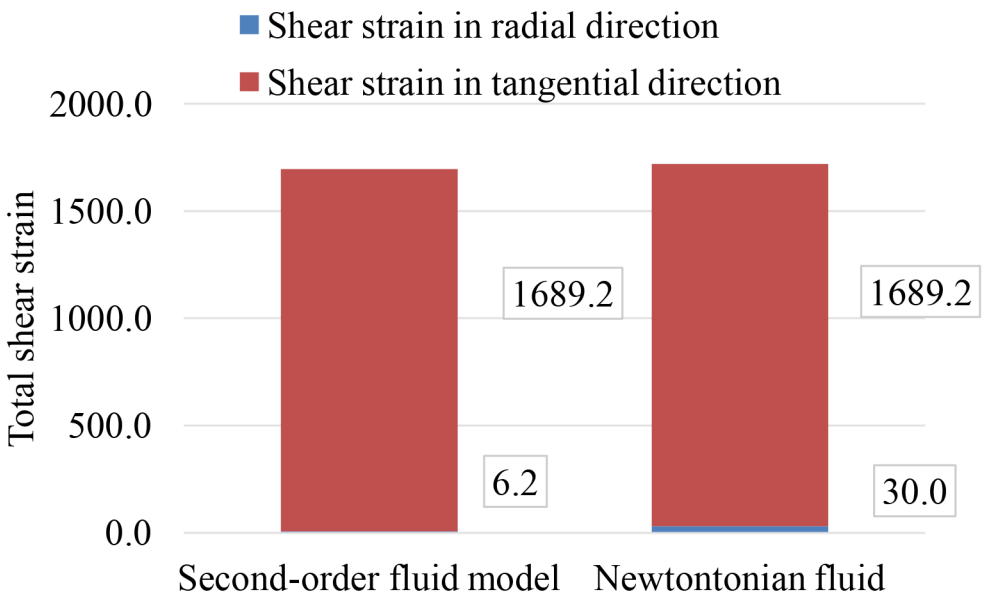


Fig. 10. Comparative diagram of the total shear strain obtained using the Newtonian fluid model and the modified second-order rheological equation

Summing up the corresponding results, we obtain graphs of the distribution of the total shear strain when using one and the other fluid model (Fig. 9). The graphs are very similar, which is reflected in the final results. Thus, when using the Newtonian fluid model, the value of the shear strain was 1719,2 units, and when using the second-order rheological equation, it was 1695 units (Fig. 10). The difference in the results is 1,38 %, which is not a significant difference when calculating the quality of melt homogenization.

Conclusions

As a result of analyzing the movement of polymer melt in the clearance between the disks of the screw-disk extruder, it was determined that the material undergoes shear strain in two mutually perpendicular directions: radial and tangential. Thus, to determine the quality of melt homogenization using the amount of shear strain, it is necessary to perform calculations for the case of biaxial shear strain, taking into account the productivity of each calculation element. Since the process is axisymmetric, the working volume was divided into calculation elements with a thickness of *dr* and a width of *dz*.

A Python program has been created that can calculate the amount of shear strain accumulated by the material as it passes through the clearance between the disks of a disk extruder. To determine the velocity fields, both the rheological model of Newtonian fluid and the modified second-order rheological equation in the Rivlin-Ericksen formulation can be used.

It has been determined that when viscoelastic properties are taken into account, the values of the radial component of velocity increase, and the time the material remains in the clearance decreases accordingly, which is explained by the effect of normal stresses. This is reflected in the amount of deformation accumulated by the material in the radial direction. When applying the Newtonian fluid model, this value is 30 units, and when taking into account viscoelastic properties, it is 6 units. It has been determined that when applying the Newtonian fluid model, the value of shear deformation does not depend on the value of the calculated radius.

The calculation of the shear deformation in the tangential direction showed identical values when applying both models, which is an obvious result when analyzing the dependencies used.

It has been determined that the values of the total accumulated deformation, taking into account viscoelastic properties and without taking them into account, are 1695,4 and 1719,2 units, respectively. Thus, the deviation of the obtained values is 1,38 %, which is not a significant difference when calculating the quality of melt homogenization.

Bibliography

1. Мікульонок І. О., Радченко Л. Б. Моделювання дискових екструдерів для перероблення полімерних матеріалів: монографія. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 103 с.

2. Трачук, Є., Швед, М., Швед, Д. Оптимізація каскадної схеми високошвидкісної екструзії. *Технічні науки та технології*. 2023. № 2 (32). С. 157–163. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-157-163 (дата звернення: 03.08.2025).

3. Мікульонок, І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 296 с.

4. OECD Data Explorer. Plastics Use – Estimations from 1990 to 2019 Available at: https://data-explorer.oecd.org/vis?tm=PLASTIC&pg=0&snb=117&vw=br&df[ds]=dsDisseminateFinalDMZ&df[id]=DSD_PU%40DF_PU&df[ag]=OECD.ENV.EEI&df[vs]=1.0&hc[Measure]=&dq=..TOTAL..A.&pd=1991%2C2019&to[TIME_PERIOD]=false (дата звернення: 03.08.2025).

5. Global plastic production| Statista. *Statista*. URL: https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/ (дата звернення: 03.08.2025).

6. Trachuk Y. V., Shved M. P. Methods of mixing quality control during polymer processing on a disk extruder. *Engineering*. 2024. № 34. С. 104–115. DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-10 (дата звернення: 03.08.2025).

7. Rauwendaal C. Polymer Extrusion. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. 950 с.

8. Tomita Y., Kato H. A Study on the Elastodynamic Pump : 2nd Report, Pump Performance. *Bulletin of JSME*. 1967. Т. 10, № 39. С. 516–523. DOI: https://doi.org/10.1299/jsme1958.10.516 (дата звернення: 03.08.2025).

9. Weissenberg K. A continuum theory of rhelogical phenomena. *Nature*. 1947. Т. 159, № 4035. С. 310–311. DOI: https://doi.org/10.1038/159310a0 (дата звернення: 03.08.2025).

10. Michalska-Pożoga, Iwona. 2006. “Wpływ tarczowego mechanizmu uplastyczniania w wytłaczarce ślimakowo - tarczowej na właściwości mechaniczne wytłoczyny : rozprawa doktorska.” Edited by Jarosław Diakun, Daniela Herman, and Robert Sikora. Koszalin: [s.n.]. URL: http://dlibra.tu.koszalin.pl/Content/1201/2006_WTM_D.pdf (дата звернення: 03.08.2025).

11. Michalska-Pożoga Iwona, Diakun, Jarosław. Simulation of polyethylene macromolecules shifting in a disk zone of an extruder. *Polimery*. 2004. № 49. С. 42–48. DOI: 10.14314/polimery.2004.042

12. Радченко Л. Б. Переробка термопластів методом екструзії. Київ : ІЗМН, 1999. 220 с.

13. Кузяєв І. М., Ситар В. І. Моделювання процесів, що відбуваються при течії в’язкопружних рідин в просторі між двома дисками. *Системні технології*. 2001. № 2 (13). С. 76–80.

14. Кузяев, И. М., Свидерский В. А., Петухов А. Д. Моделирование экструзии и экструдеров при переработке полимеров. Часть 2. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. 276 с.

15. Кузяєв І. М. Розрахунок деформаційнонапруженого стану розплавів полімерів при течії між двома дисками, один з яких обертається. *Вопр. химии и хим. технол*. 2001. № 6. С. 146–151.

References

1. Mikulonok I. O., Radchenko L. B. (2015) *Modeliuvannia dyskovykh ekstruderiv dlia pereroblennia polimernykh materialiv* [Modeling of disk extruders for processing polymer materials]. Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. (in Ukrainian).

2. Trachuk, Y., Shved, M., Shved, D. (2023) Optymizatsiia kaskadnoi skhemy vysokoshvydkisnoi ekstruzii [Optimization of a cascade scheme for high-speed extrusion]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii* [Technical sciences and technologies] (electronic journal), vol. 2, no. 32, pp. 157–163. Retrieved from: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-2(32)-157-163 (accessed 03 August 2025).

3. Mikulonok I. O. (2020) *Tekhnolohichni osnovy pereroblennia polimernykh materialiv* [Technological foundations of polymer material processing]. Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. (in Ukrainian)

4. OECD Data Explorer. Plastics Use – Estimations from 1990 to 2019 Available at: https://data-explorer.oecd.org/vis?tm=PLASTIC&pg=0&snb=117&vw=br&df[ds]=dsDisseminateFinalDMZ&df[id]=DSD_PU%40DF_PU&df[ag]=OECD.ENV.EEI&df[vs]=1.0&hc[Measure]=&dq=..TOTAL..A.&pd=1991%2C2019&to[TIME_PERIOD]=false (accessed 03 August 2025).

5. Statista. Global plastic production. Available at: https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/ (accessed 03 August 2025).

6. Trachuk Y. V., Shved M. P. (2024). Metody rehuliuvannia yakosti zmishuvannia pry pererobtsi polimeriv na dyskovomu ekstruderi [Methods of mixing quality control during polymer processing on a disk extruder]. *Mashynobuduvannia* [Engineering] (electronic journal), no. 34, pp. 104–115. Retrieved from: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2024-34-10 (accessed 03 August 2025).

7. Rauwendaal C. (2014) Polymer Extrusion. München : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.

8. Tomita Y., Kato H. (1967) A Study on the Elastodynamic Pump : 2nd Report, Pump Performance. *Bulletin of JSME*. no 39. pp. 516–523. Retrieved from: https://doi.org/10.1299/jsme1958.10.516 (accessed 03 August 2025).

9. Weissenberg K. (1947) A continuum theory of rhelogical phenomena. *Nature*. no. 4035. С. 310–311. Retrieved from: https://doi.org/10.1038/159310a0 (accessed 03 August 2025).

10. Michalska-Pożoga Iwona. (2006) “Wpływ tarczowego mechanizmu uplastyczniania w wytłaczarce ślimakowo – tarczowej na właściwości mechaniczne wytłoczyny [Influence of the disc mechanism plasticization in screw – disk extruder on mechanical proprieties material] : rozprawa doktorska. Koszalin, 143 p. (in Polish) Retrieved from: http://dlibra.tu.koszalin.pl/Content/1201/2006_WTM_D.pdf (accessed 03 August 2025).

11. Michalska-Pożoga, Iwona, Diakun Jarosław. (2004). Simulation of polyethylene macromolecules shifting in a disk zone of an extruder. *Polimery*, (electronic journal), vol. 1, no. 49, pp. 42–48. Retrieved from https://polimery.ichp.vot.pl/index.php/p/article/view/1724 (accessed 03 August 2025).

12. Radchenko L. B. (1999) *Pererobka termoplastiv metodom ekstruzii* [Processing thermoplastics by extrusion]. Kyiv : IZMN. (in Ukrainian)

13. Kuziaiev, I. M., Sytar V. I. (2001) Modeliuvannia protsesiv, shcho vidbuvaiutsia pry techii viazkopruzhnykh ridyn v prostori mizh dvoma dyskamy [Modeling of processes occurring during the flow of viscoelastic fluids in the space between two discs]. *Systemni tekhnolohii* [System technologies], vol. 2, no. 13, pp. 76–80.

14. Kuziaiev I. M., Svyderskyi V. A., Petukhov A. D. (2016) Modelyrovanye ekstruzyy y ekstruderov pry pererabotke polymerov. Chast 2 [Modeling extrusion and extruders in polymer processing. Part 2]. Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. (in Russian)

15. Kuziaiev. I. M. Rozrakhunok (2001) deformatsiinonapruzhenoho stanu rozplaviv polimeriv pry techii mizh dvoma dyskamy, odyn z yakykh obertaietsia [Calculation of the deformation-stress state of polymer melts flowing between two discs, one of which rotates] *Vopr. khymyy y khym. Tekhnol* [Issues of chemistry and chemical technology] no. 6.

Дата першого надходження рукопису до видання: 26.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 621.181.6:620.91 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.35

С. М. ФОРИСЬ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0000-0001-7104-640X

А. Ю. УСЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0000-0001-7467-6220

В. Я. ПЕРЕРВА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри теплового інжинірингу та енергетичних технологій
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
ORCID: 0000-0003-0665-6812

РЕКУПЕРАЦІЯ НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНОГО ТЕПЛА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДПРИЄМСТВ

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю пошуку нових шляхів підвищення енергоефективності промислових підприємств в умовах зростання цін на енергоносії та посилення вимог до енергетичної безпеки. Значна частка теплових ресурсів у виробничих процесах втрачається у формі низькопотенційного тепла, яке може бути перетворене на корисну енергію за умови застосування сучасних технологій рекуперації. Використання таких потоків автор розглядає як стратегічний інструмент формування автономного енергопостачання, що водночас сприяє скороченню залежності від зовнішніх джерел та зменшенню екологічних навантажень.

Метою статті є наукове обґрунтування концептуальних і прикладних засад використання низькопотенційного тепла промислових процесів для створення систем автономного енергозабезпечення, а також визначення найбільш ефективних напрямів його застосування в умовах сучасних викликів енергетичної стійкості.

Методологія дослідження ґрунтується на системному підході, що передбачає аналіз фізико-технічних характеристик джерел низькопотенційного тепла, оцінку потенціалу їхньої рекуперації, вивчення принципів інтеграції у виробничу інфраструктуру, а також порівняння економічної доцільності для підприємств різних галузей. Використано методи класифікаційного та порівняльного аналізу, енергетичного моніторингу та узагальнення результатів сучасної виробничої практики.

Результати дослідження полягають у встановленні закономірностей утворення низькопотенційних теплових потоків і доведенні їхнього значного енергетичного потенціалу. Виявлено, що ефективна інтеграція систем рекуперації можлива лише за умови поєднання технічної сумісності, гнучкості теплових потоків, модульності та автоматизації управління. Проаналізовано економічні переваги впровадження, що полягають у скороченні витрат на енергоресурси, підвищенні стабільності виробничих циклів і зростанні конкурентоспроможності підприємств.

Висновки підтверджують, що системне використання низькопотенційного тепла здатне забезпечити підприємствам високий рівень енергетичної автономності, зменшити залежність від зовнішніх джерел енергії та одночасно оптимізувати виробничі витрати. Виявлено ключові бар'єри впровадження значні капітальні витрати, складність технологічної інтеграції, брак підготовлених кадрів і недосконалість нормативної бази.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням цифрових систем керування тепловими потоками на основі штучного інтелекту, розвитком технологій акумулювання енергії, створенням єдиних стандартів оцінки ефективності рекуперaційних рішень та розробленням механізмів державного стимулювання їхнього впровадження у промисловості.

Ключові слова: *енергоефективність, теплові втрати, промислові підприємства, автономні системи, рекуперація низькопотенційного тепла.*

© Форись С. М., Усенко А. Ю., Перерва В. Я., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

S. M. FORYS
PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy Systems
and Energy Management
Ukrainian State University of Science and Technologies
ORCID: 0000-0001-7104-640X

A. YU. USENKO
PhD in Engineering, Associate Professor,
Head of the Department of Energy Systems and Energy Management
Ukrainian State University of Science and Technologies
ORCID: 0000-0001-7467-6220

V. YA. PERERVA
PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Thermal Engineering
and Energy Technology
Dnipro University of Technology
ORCID: 0000-0003-0665-6812

RECUPERATION OF LOW-GRADE HEAT FROM TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR AUTONOMOUS ENERGY SUPPLY OF ENTERPRISES

The relevance of the study is driven by the urgent need to identify new approaches to improving the energy efficiency of industrial enterprises under conditions of rising energy costs and increasing demands for energy security. A significant proportion of thermal resources in production processes is lost in the form of low-grade heat, which can be converted into useful energy when modern recovery technologies are applied. The author considers the utilization of such heat streams as a strategic tool for establishing autonomous energy supply systems, simultaneously reducing dependence on external sources and mitigating environmental impacts.

The purpose of this article is to provide a scientific rationale for the conceptual and applied foundations of utilizing low-grade industrial heat to develop autonomous energy supply systems, as well as to identify the most effective directions for its application under current challenges of energy resilience.

The research methodology is based on a systems approach that includes an analysis of the physical and technical characteristics of low-grade heat sources, an assessment of their recovery potential, a study of integration principles into production infrastructure, and a comparison of the economic feasibility across various industrial sectors. Methods of classification and comparative analysis, energy monitoring, and synthesis of contemporary industrial practices were employed.

The results demonstrate the patterns of low-grade heat formation and confirm its significant energy potential. The findings show that the effective integration of recovery systems is feasible only when technical compatibility, flexibility of heat streams, modularity, and automation of control are combined. The economic benefits of implementation are substantiated, including reductions in energy costs, improved stability of production cycles, and enhanced competitiveness of enterprises.

The conclusions confirm that the systematic use of low-grade heat can provide enterprises with a high degree of energy autonomy, reduce dependence on external energy sources, and simultaneously optimize production costs. However, several key barriers to implementation were identified, including high capital expenditures, complexity of technological integration, shortage of qualified personnel, and deficiencies in regulatory frameworks.

Future research perspectives are associated with the advancement of digital heat-flow management systems based on artificial intelligence, the development of energy storage technologies, the establishment of unified standards for assessing the efficiency of recovery solutions, and the creation of state-level mechanisms to incentivize their adoption in industry.

Key words: *energy efficiency, heat losses, industrial enterprises, autonomous systems, low-grade heat recovery.*

Постановка проблеми

Моделювання процесів зносу та відновлення твердих сплавів є важливим завданням у контексті забезпечення надійності й довговічності деталей машин сільськогосподарського виробництва. Робочі елементи техніки в умовах інтенсивних механічних навантажень, впливу абразивного та корозійного середовища зазнають прискореного руйнування, що зумовлює втрату працездатності й підвищення експлуатаційних витрат. Актуальність проблеми посилюється високою вартістю виробництва нових деталей та необхідністю підтримання стабільності роботи машинно-тракторного парку в умовах сезонних пікових навантажень.

Розробка математичних моделей, що дозволяють описати механізми зношування та прогнозувати залишковий ресурс деталей, має прямий зв’язок із практичними завданнями підвищення ефективності експлуатації сільськогосподарської техніки. Такі підходи забезпечують можливість планування ремонтів, обґрунтування вибору

оптимальних технологій відновлення та мінімізації простоїв обладнання. Водночас результати дослідження відкривають перспективи підвищення продуктивності та конкурентоспроможності аграрного виробництва за рахунок раціонального використання технічних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наукові праці, присвячені рекуперації низькопотенційного тепла технологічних процесів для автономного енергозабезпечення підприємств, можна згрупувати в чотири напрями. Перший напрям охоплює регуляторно-технологічні передумови декарбонізації та локальної енергетичної автономії. М. Павловський (M. Pavlovskyi) доводить, що заміщення викопного пального біодизельними сумішами підвищує паливну ефективність і покращує екологічні показники дизельних двигунів, зменшуючи питомі викиди у виробничих процесах джерелах низькопотенційного тепла [1]. О. Коростін акцентує увагу на методологічних підходах до зменшення вуглецевого сліду тренувань моделей машинного навчання (ML); такі рішення можуть бути адаптовані до цифрової інфраструктури енергоаудиту та оптимізації рекуперaційних схем, знижуючи «приховані» викиди IT-ланки енергоменеджменту [2]. П. Хмєлярж (P. Chmielarz), аналізуючи практики медіації в соціально-господарських справах, окреслює інституційні механізми узгодження інтересів стейкґолдерів, необхідні для впровадження промислових систем рекуперації тепла на підприємствах та у промислових парках [3]. У розвиток цієї логіки П. Хмєлярж (P. Chmielarz) зазначає, що енергетична безпека постачання газу залежить від політико-правових заходів, спрямованих на диверсифікацію джерел і створення локальних гнучких потужностей; це формує попит на низькопотенційні технології як інструмент зниження пікового споживання та підвищення стійкості на рівні підприємств і громад [4]. Узагальнюючи, варто розширювати міждисциплінарні моделі оцінювання «сукупної вартості володіння» рекуперaційними технологіями з урахуванням організаційної медіації, IT-вуглецевого сліду та сценаріїв енергетичної безпеки; доцільно проводити політико-економічні дослідження зі стимулюючими контрактами для місцевих енергоспільнот.

Другий напрям охоплює фундаментальні та оглядові дослідження технологій рекуперації низькопотенційного тепла в будівлях і промисловості.

Д. Лю (D. Liu), Ф. Чжао (F. Y. Zhao), Г. Тан (G. F. Tang) одними з перших систематизували «активні» стратегії відбору низькопотенційного тепла в будівельних системах (теплові насоси, рекуператори вентиляції, міжсезонні акумулятори), підкресливши значення керованості потоків і температурних рівнів для досягнення реальної енергоекономії [5]. Д. Цзі (D. Ji), Г. Лю (G. Liu), А. Романйолі (A. Romagnoli) та співавтори узагальнюють сучасний спектр технологій від органічних циклів Ренкіна і сорбційних машин до інтеграції теплових насосів у процесні контури і пропонують метрики порівняння за ексергетичною ефективністю та рівнем технологічної готовності [6]. В. Чен (W. Chen), З. Хуан (Z. Huang), К. Чуа (K. J. Chua) на матеріалі термопроцесів доводять, що сталий процес відновлення енергії (*energy recovery*) потребує поєднання технології відбору з відповідним «споживачем» теплоти та тепловою логістикою (акумулювання, каскадування) для мінімізації втрат ексергії та зменшення простоїв [7].

Е. Гарофало (E. Garofalo), М. Бевіоне (M. Bevione), Л. Чеккіні (L. Cecchini) та співавтори конкретизують клас «waste-heat-to-power» технологій і демонструють нішеві та масові застосування Organic Rankine Cycle (органічного циклу Ренкіна) ORC/Каліни/термоелектрики, окреслюючи діапазони температур, питомі потужності й економічні обмеження для промислових майданчиків [8]. Узагальнення за напрямом: необхідні порівняльні польові дослідження «технологія-до-джерела» з повною тепловою інвентаризацією, оцінкою незворотностей і деградації коефіцієнта корисної дії (ККД) упродовж життєвого циклу, а також стандартизація профілів джерел низькопотенційного тепла для швидкого підбору технологічних рішень.

Третій напрям присвячений інтеграції низькопотенційного тепла в архітектуру енергохабів та плануванню інтегрованих енергосистем. М. Россі (M. Rossi), Л. Цзін (L. Jin), А. Феррaріо (A. Ferrario) та співавтори описують енергохаби та мікро-енергохаби в локальних енергоспільнотах, де низькопотенційне тепло моделюється як керований ресурс у мультивекторній системі (тепло, електрика, холод), що підвищує автономність підприємств і дозволяє оптимізувати розклад роботи обладнання [9]. Ц. Дін (C. Ding), С. Чжан (X. Zhang), Г. Лян (G. Liang) та співавтори пропонують ексергетично орієнтоване планування інтегрованих енергосистем із промисловою рекуперацією, показуючи, що максимізація корисної роботи замість простої енергії забезпечує ефективніші рішення щодо підбору теплообмінних мереж, насосів та генерації [10]. М. Акашах (M. Akashah), Н. Розалі (N. Rozali), С. Махадзір (S. Mahadzir) та співавтори систематизують використання «холоду» регазифікації скрапленого природного газу (СПГ) як цінного низькопотенційного ресурсу для холодопостачання, кріопроцесів і комбінованого виробництва холоду та електрики, що відкриває нетривіальні зв'язки між газовою логістикою та локальною автономією підприємств [11]. Дж. Ю (J. Yu), І. Ся (Y. Xia), Л. Чен (L. Chen) та співавтори демонструють процесно-інтегрований (Air-Carried Evaporating Separation Cycle) ACES-цикл для повного відновлення розсолів за рахунок тепла процесу при нормальних температурах, поєднуючи рекуперацію низькопотенційного тепла із водними та матеріальними потоками і створюючи додану вартість через безстічність [12]. Узагальнення за напрямом: перспективним є поєднання ексергетичного планування з мультиоб'єктивною оптимізацією капітальних та експлуатаційних витрат, викидів та надійності, а також спільне проєктування (co-design) теплових, холодових та водних контурів енергохабів; потрібні

цифрові близнюки на рівні цехів із верифікацією за реальними диспетчерськими даними. Четвертий напрям фокусується на перетворювальних технологіях і новітніх пристроях для збору низькопотенційного тепла. М. Бхуян (M. Bhuiyan), Х. Мамур (H. Mamur), М. Устюнер (M. Üstüner) та співавтори окреслюють сучасний стан термоелектричних генераторів для рекуперації тепла у широкому температурному діапазоні, підкреслюючи матеріалознавчі бар'єри (ZT, стабільність контактів), модульну інтеграцію на поверхні обладнання та економіку малої потужності [13]. Ф. Гун (F. Gong), Х. Лі (H. Li), Дж. Хуан (J. Huang) та співавтори демонструють біоміметичний м'який актуатор для збору розсіяної пари низького тиску з перетворенням її в електроенергію, що відкриває шлях до «розподіленого мікрозбору» тепла у важкодоступних ділянках технологічних ліній [14]. В. Чу (W. Chu), М. Вічідоміні (M. Vicidomini), Ф. Калізе (F. Calise) та співавтори підсумовують методологічні та економічні підходи до стійких енергетичних систем, релевантні для проєктів рекуперації: від порівняння термотехнологій і сценарного аналізу до інтеграції з водними та екологічними показниками, що дозволяє вбудовувати пристрої у ширші «енерго-вода-довкілля» рамки [15]. У цьому напрямі доцільно просувати прикладні дослідження гібридних перетворювачів (термоелектрика+ORC, сорбція+теплові насоси), довготривалі випробування на реальних об'єктах із моделями деградації та створення бібліотек «plug-and-play» модулів для ретрофіту.

Попри значні дослідження у сфері рекуперації низькопотенційного тепла, невирішеними залишаються питання комплексного аналізу фізико-технічних характеристик джерел теплових втрат, оцінки їхнього реального енергетичного потенціалу та визначення оптимальних підходів інтеграції систем у наявну виробничу інфраструктуру. Додатково відзначаються прогалини в дослідженні економічної ефективності застосування таких технологій для підприємств різних галузей, а також у подоланні бар'єрів, пов'язаних із високими капітальними витратами, браком кваліфікованих спеціалістів та недосконалістю нормативно-правового регулювання.

Запропоноване дослідження спрямоване на заповнення цих прогалин шляхом системного аналізу джерел теплових втрат, виявлення практичних проблем інтеграції та формулювання рекомендацій для підвищення ефективності використання низькопотенційного тепла. Такий підхід забезпечує надання прикладних орієнтирів для промислових підприємств, спрямованих на скорочення енергетичних витрат, зниження залежності від зовнішніх джерел та створення умов для підвищення енергетичної автономності.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є обґрунтування теоретичних і практичних засад рекуперації низькопотенційного тепла технологічних процесів для забезпечення автономного енергопостачання промислових підприємств та визначення ефективних напрямів його використання в умовах сучасних викликів енергетичної безпеки.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких **завдань**:

1. Дослідити фізико-технічні характеристики джерел низькопотенційного тепла та обґрунтувати оптимальні принципи їхньої інтеграції у виробничу інфраструктуру.
2. Оцінити економічну ефективність рекуперації низькопотенційного тепла та виявити ключові бар'єри впровадження рекуперaційних технологій.
3. Розробити практичні рекомендації щодо підвищення ефективності використання низькопотенційного тепла для забезпечення енергетичної автономності підприємств.

Викладення основного матеріалу дослідження

У промислових технологічних процесах низькопотенційне тепло є побічним продуктом, що утворюється внаслідок охолодження обладнання, втрат у теплопередачі або скидання відпрацьованих газів та рідин. Це тепло традиційно розсіюється в навколишнє середовище, проте воно має значний енергетичний потенціал для повторного використання. Його дослідження передбачає аналіз фізико-технічних характеристик, які визначають можливості рекуперації та подальшої трансформації у корисну енергію. До ключових параметрів належать температура джерела, тепловий потік, агрегатний стан середовища та стабільність його тепловіддачі. Саме поєднання цих характеристик визначає доцільність вибору конкретного технологічного рішення для впровадження систем рекуперації (табл. 1).

Таблиця 1

Основні фізико-технічні характеристики джерел низькопотенційного тепла у виробничих процесах

Джерело тепла	Тип середовища	Температурний діапазон, °С	Орієнтовний тепловий потік, кВт·год/рік	Особливості використання
Відпрацьовані гази	Газоподібне	80–250	10 000–50 000	Необхідне попереднє очищення від домішок і пилу
Охолоджувальні рідини	Рідинне	40–120	5 000–30 000	Доцільне використання теплових насосів
Технологічні стоки	Рідинне	30–90	2 000–15 000	Використання для підігріву водопостачання
Поверхневе випромінювання обладнання	Тверде середовище/ поверхні	25–80	1 000–8 000	Рекомендована ізоляція та застосування локальних рекуператорів

Джерело: сформовано авторами на підставі [2, с. 42–44; 3, с. 47; 5, с. 2740–2742; 10, с. 148080–148082]

Відпрацьовані гази промислових печей та сушильних установок є найбільш концентрованим джерелом низькопотенційного тепла, однак вимагають попереднього очищення від твердих частинок та агресивних сполук, що ускладнює процес рекуперації. Використання сучасних багатоступеневих фільтраційних систем дозволяє інтегрувати їх у контури теплообміну без шкоди для обладнання. Охолоджувальні рідини, які циркулюють у компресорних станціях, холодильних установках та технологічних лініях, характеризуються стабільними параметрами і добре піддаються перетворенню через теплові насоси, що робить їх особливо привабливими для систем опалення та кондиціонування виробничих площ [12]. Технологічні стоки, характерні для харчової та хімічної промисловості, мають нижчі температурні показники, проте їхній великий обсяг та постійність надходження створюють умови для ефективного використання у системах гарячого водопостачання. Поверхневе випромінювання від корпусів машин, котлів чи конвеєрних ліній часто недооцінюють, хоча сучасні локальні рекуператори та інфрачервоні панелі дають змогу акумулювати цю енергію та спрямовувати її для підтримки мікроклімату у виробничих зонах [7]. У сукупності ці приклади демонструють, що низькопотенційне тепло, яке раніше вважали лише побічним продуктом виробництва, сьогодні може бути перетворене на стратегічний ресурс енергоефективності, знижуючи витрати на зовнішнє енергопостачання та підвищуючи автономність промислових підприємств.

Інтеграція систем рекуперації низькопотенційного тепла у виробничу інфраструктуру вимагає комплексного підходу, що враховує як технічні, так і організаційні аспекти. З одного боку, йдеться про сумісність рекуперацій-них установок із наявним обладнанням, оптимізацію теплових потоків та забезпечення стабільності технологічних режимів. З іншого – про необхідність адаптації управлінських процесів, регламентів експлуатації та економічного обґрунтування впровадження. Коректне визначення принципів інтеграції дозволяє уникнути порушення виробничих циклів, підвищити ефективність енергоспоживання та мінімізувати додаткові витрати (табл. 2).

Таблиця 2

Принципи інтеграції систем рекуперації у виробничу інфраструктуру

Принцип інтеграції	Технічна характеристика	Організаційна складова	Очікуваний ефект
Сумісність з технологічним обладнанням	Вибір теплообмінників та насосів, що відповідають параметрам наявних ліній	Розробка регламентів технічного обслуговування	Безперервність виробництва
Гнучкість теплових потоків	Використання буферних ємностей та акумуляторів тепла	Планування графіків навантаження	Стабільність енергопостачання
Модульність та масштабованість	Побудова системи з окремих блоків, які легко додати чи демонтувати	Можливість поетапного фінансування	Зниження інвестиційних ризиків
Автоматизація керування	Інтеграція з системами система диспетчерського контролю та збору даних (далі SCADA) та система планування ресурсів підприємства (далі --ERP)	Навчання персоналу роботі з цифровими інтерфейсами	Оптимізація витрат та контроль
Економічна доцільність	Баланс між вартістю обладнання та очікуваним енергозбереженням	Використання механізмів енергетичного аудиту	Скорочення собівартості продукції

Джерело: сформовано авторами на підставі [1; 4, с. 200–201; 6; 7; 9]

Реалізація принципу сумісності на практиці означає, що нові рекуперaційні модулі не повинні порушувати логіку вже сформованих виробничих циклів. У металургії це досягається встановленням теплообмінників безпосередньо у газоходах доменних печей, що дозволяє відбирати тепло для підігріву шихти без зміни основних параметрів плавки. Гнучкість теплових потоків проявляється у здатності компенсувати коливання навантажень: у харчовій промисловості буферні ємності згладжують перепади, що виникають у процесі пастеризації чи охолодження, зберігаючи рівномірність енергопостачання. Принцип модульності особливо цінний для підприємств із нестабільним фінансуванням: впровадження відбувається поетапно, починаючи з базових модулів та поступово розширюючись до повноцінних систем [9]. Автоматизація інтеграції забезпечує якісно новий рівень керованості, коли дані про теплові потоки в режимі реального часу синхронізуються з виробничими та фінансовими показниками підприємства, створюючи можливості для точного прогнозування й планування. Нарешті, економічна доцільність не обмежується лише окупністю: системи рекуперації формують нову культуру енерговикористання, де тепло перестає бути відходом і перетворюється на актив, що знижує собівартість продукції та посилює конкурентні позиції підприємства.

Економічна доцільність рекуперації низькопотенційного тепла визначається передусім здатністю підприємства зменшити витрати на енергоносії та підвищити рівень автономності енергопостачання. Важливою особливістю є те, що вигода проявляється по-різному залежно від галузі та масштабу виробництва. Для енергоємних підприємств стратегічним чинником стає значне скорочення паливних витрат, тоді як для малих і середніх виробництв вирішальне значення мають стабільність і передбачуваність енергозабезпечення. Таким чином, доцільність використання рекуперaційних технологій не слід розглядати лише в категоріях окупності, але й у ширшому контексті економічної стійкості та конкурентоспроможності (табл. 3).

Таблиця 3

Економічна доцільність застосування рекуперацiйних технологій у різних типах підприємств

Тип підприємства	Характеристика використання рекуперації	Основний економічний ефект	Стратегічне значення
Металургійні комбінати	Відбір тепла від газоходів та печей для підігріву сировини	Значне скорочення витрат на паливо	Формування конкурентних переваг у висококонкурентній галузі
Хімічні заводи	Використання тепла реакторів і стоків у виробничих циклах	Зменшення витрат на утилізацію і повторне залучення енергії	Підвищення ефективності технологічних процесів
Харчові підприємства	Рекуперація тепла охолоджувальних рідин і стоків	Швидке зниження операційних витрат	Забезпечення стабільності енергопостачання
Деревообробні підприємства	Використання тепла сушильних камер і відпрацьованих газів	Оптимізація витрат на газ	Підвищення ефективності основних технологічних процесів
Машинобудівні підприємства	Використання тепла охолоджувальних систем і обладнання	Зменшення витрат на опалення виробничих приміщень	Поліпшення умов праці та якості продукції

Джерело: сформовано авторами на підставі [8; 11; 12; 13, с. 897–901; 14; 15]

Для великих металургійних комбінатів ключовим є те, що відбір тепла з доменних або мартенівських печей не лише скорочує споживання палива, а й забезпечує дотримання жорстких екологічних нормативів, оскільки знижується інтенсивність викидів CO_2 [6]. У хімічних виробництвах повторне використання тепла від реакторних процесів і технологічних стоків дозволяє зменшити навантаження на очисні споруди та одночасно підвищити ефективність основних виробничих циклів. Це демонструє подвійний економічний ефект: економію енергії та зменшення витрат на рекуперацію.

Харчова промисловість вирізняється найшвидшою окупністю таких рішень, адже відбір тепла від охолоджувальних установок чи пастеризаційних ліній стабільно використовується для опалення приміщень і гарячого водопостачання. У результаті навіть середні за масштабом підприємства отримують можливість зменшити залежність від газових котелень та підвищити конкурентоспроможність продукції за рахунок нижчих операційних витрат. Деревообробні підприємства, особливо ті, що займаються сушінням пиломатеріалів, інтегрують системи утилізації тепла від сушильних камер, що дозволяє не лише оптимізувати витрати на енергоносії, а й підвищити якість готової продукції завдяки більш стабільному режиму сушіння. У машинобудуванні рекуперацію тепла від охолоджувальних систем важкого обладнання використовують для обігріву цехів, створюючи комфортні умови праці та одночасно знижуючи енергетичні витрати на вентиляцію і опалення.

Упровадження систем рекуперації низькопотенційного тепла у виробництво обмежується комплексом проблем, що формують взаємопов'язані бар'єри. Найпомітнішими є високі капітальні витрати: сучасні теплообмінники, системи очищення газів та автоматизованого керування потребують значних інвестицій, що для малих і середніх підприємств без доступу до пільгового фінансування стає критичною перешкодою [2, с. 42–44]. До цього додається технологічна складність інтеграції: рекуперaційні установки мають працювати у вже сформованих циклах із жорсткими параметрами температури та тиску, і будь-які відхилення можуть вплинути на якість продукції або безперервність процесу [10, с. 148080–148082].

Організаційні проблеми зумовлені браком підготовлених фахівців: більшість підприємств не мають енергоменеджерів, а персонал орієнтований на традиційні теплотехнічні системи. Як наслідок, обладнання експлуатується нижче розрахункових можливостей і швидше виводиться з експлуатації [3, с. 47]. Додатково розвиток стримує відсутність чіткої нормативно-правової бази: стандарти інтеграції та механізми стимулювання залишаються фрагментарними, що створює невизначеність для інвесторів та управлінців [15].

Не менш суттєвими є експлуатаційні обмеження. Відпрацьоване тепло часто має низьку та нестабільну температуру, через що потрібні додаткові системи, зокрема теплові насоси та акумулятори, які подовжують строк окупності [6]. Проблемою є також необхідність модернізації допоміжної інфраструктури трубопроводів, теплоізоляції та систем автоматичного регулювання, без яких ефективність рекуперації значно знижується [9]. Нарешті, суттєвим ризиком є простої під час монтажу: зупинка технологічних ліній для інтеграції обладнання призводить до втрат продуктивності, що неприпустимо для підприємств із безперервним циклом [14].

Ефективне використання низькопотенційного тепла як інструмента автономного енергозабезпечення підприємств вимагає комплексного поєднання технічних, організаційних та управлінських рішень, здатних забезпечити максимальну віддачу від наявних теплових ресурсів. Практика демонструє, що першочерговим завданням є впровадження систем енергетичного моніторингу, які дозволяють виявляти та кількісно оцінювати теплові втрати на різних етапах виробничих процесів. Це створює підґрунтя для раціонального підбору технологій рекуперації та прогнозування ефекту їхнього застосування.

Другим важливим напрямом є інтеграція рекуперaційних систем із внутрішніми енергетичними контурами підприємства. Використання відпрацьованого тепла для підігріву сировини, опалення приміщень чи забезпечення гарячого водопостачання дозволяє скорочувати залежність від зовнішніх джерел енергії та знижувати

собівартість продукції. У багатьох випадках ефективність такого підходу посилюється завдяки застосуванню теплових насосів і теплоакумулювальних установок, що забезпечують стабільний тепловий баланс навіть за умов нерівномірного надходження тепла.

Значну роль відіграє цифровізація управління тепловими потоками. Використання автоматизованих систем керування на базі SCADA або ERP дає змогу інтегрувати рекуперaційні рішення у загальну виробничу інфраструктуру, оптимізуючи розподіл енергії в реальному часі. Це не лише підвищує енергоефективність, а й мінімізує ризики аварійних ситуацій та забезпечує формування достовірної бази даних для стратегічного планування.

Організаційна складова включає підготовку персоналу та розвиток внутрішніх компетентностей у сфері енергоменеджменту. Наявність фахівців, здатних аналізувати теплові баланси, ухвалювати рішення щодо модернізації обладнання та контролювати роботу систем рекуперації, є передумовою стабільності та довготривалого ефекту від інвестицій. У поєднанні з цим актуальним є створення механізмів фінансового стимулювання, зокрема через податкові пільги або цільові програми підтримки підприємств, що впроваджують енергоефективні технології.

Таким чином, максимальний ефект від використання низькопотенційного тепла досягається тоді, коли технічні рішення підкріплені організаційними заходами та підтримані економічними інструментами. Системна інтеграція рекуперaційних технологій у виробничу та управлінську інфраструктуру перетворює їх на потужний фактор енергетичної автономності підприємств, здатний забезпечити стійкість до зовнішніх викликів і сформувати новий рівень конкурентоспроможності.

Висновки

У дослідженні доведено, що рекуперація низькопотенційного тепла промислових процесів може слугувати надійним джерелом автономного енергозабезпечення підприємств. Установлено, що навіть джерела з невисокими температурними параметрами здатні забезпечувати суттєвий енергетичний ефект за умови коректної інтеграції у виробничі контури. Сформульовано принципи впровадження таких систем, які поєднують технічну сумісність, гнучкість теплових потоків, модульність та цифрове управління, що дозволяє знизити залежність від зовнішніх ресурсів і водночас підвищити конкурентоспроможність.

Виявлено основні обмеження: значні інвестиційні витрати, технологічні труднощі інтеграції у наявні цикли, нестача кваліфікованих кадрів та відсутність належної нормативно-правової підтримки. Саме ці чинники залишаються ключовими бар'єрами для широкого впровадження рекуперaційних технологій у промисловості.

Рекомендовано розвивати системи енергетичного моніторингу, впроваджувати теплові насоси та акумуляційні установки, підвищувати рівень цифровізації управління енергією, готувати спеціалізованих фахівців і формувати фінансові стимули для підприємств-інвесторів. Перспективи подальших досліджень полягають у створенні моделей штучного інтелекту для керування тепловими потоками, розвитку сенсорних технологій моніторингу та формуванні уніфікованих стандартів оцінки ефективності таких систем.

Список використаної літератури

1. Pavlovskyi M. The Improvement of Fuel Efficiency and Environmental Characteristics of Diesel Engine by Using Biodiesel Fuels. In: Boichenko S., Zaporozhets A., Yakovlieva A., Shkilniuk I. (eds) *Modern Technologies in Energy and Transport*. Studies in Systems, Decision and Control, vol 510. Springer, Cham. 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_4

2. Korostin O. O. Approaches to reducing the carbon footprint in training large ML models. *Taurida Scientific Herald. Series: Technical Sciences*. 2025. № 1. P. 40–51. DOI: https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.1.5

3. Chmielarz P. Problematyka mediacji w sprawach społecznych i gospodarczych. *Studia Politologica*. 2022. Vol. 28, № 370. P. 45–60. URL: https://studiapolitologica.uken.krakow.pl/article/view/10777 (date of access: 10.09.2025).

4. Chmielarz P. Analiza bezpieczeństwa energetycznego Rzeczypospolitej Polskiej w zakresie dostaw gazu ziemnego w latach 2015–2021 w powiązaniu z działaniami politycznymi oraz prawnymi. *Rocznik Integracji Europejskiej*. 2023. № 17. P. 197–206. DOI: https://doi.org/10.14746/rie.2023.17.12

5. Liu D., Zhao F. Y., Tang G. F. Active low-grade energy recovery potential for building energy conservation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14, № 9. P. 2736–2747. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.005

6. Ji D., Liu G., Romagnoli A., Rajoo S., Besagni G., Markides C. N. Low-grade thermal energy utilization: Technologies and applications. *Applied Thermal Engineering*. 2024. Vol. 244. Article 122618. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122618

7. Chen W., Huang Z., Chua K. J. Sustainable energy recovery from thermal processes: a review. *Energy, Sustainability and Society*. 2022. Vol. 12, № 46. DOI: https://doi.org/10.1186/s13705-022-00372-2

8. Garofalo E., Bevione M., Cecchini L., Mattiussi F., Chiolerio A. Waste heat to power: Technologies, current applications, and future potential. *Energy Technology*. 2020. Vol. 8, № 11. Article 2000413. DOI: https://doi.org/10.1002/ente.202000413

9. Rossi M., Jin L., Monforti Ferrario A., Di Somma M., Buonanno A., Papadimitriou C., Comodi G. Energy hub and micro-energy hub architecture in integrated local energy communities: enabling technologies and energy planning tools. *Energies*. 2024. Vol. 17, № 19. Article 4813. DOI: https://doi.org/10.3390/en17194813

10. Ding C., Zhang X., Liang G., Feng J. Optimizing Exergy Efficiency in Integrated Energy System: A Planning Study Based on Industrial Waste Heat Recovery. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 148074–148089. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3468291

11. Noor Akashah M. H., Mohammad Rozali N. E., Mahadzir S., Liew P. Y. Utilization of cold energy from LNG regasification process: a review of current trends. *Processes*. 2023. Vol. 11, № 2. Article 517. DOI: https://doi.org/10.3390/pr11020517

12. Yu J., Xia Y., Chen L., Yan W., Liu B., Jin S. Full recovery of brines at normal temperature with process-heat-supplied coupled air-carried evaporating separation (ACES) cycle. *npj Clean Water*. 2024. Vol. 7, № 1. Article 133. DOI: https://doi.org/10.1038/s41545-024-00430-6

13. Bhuiyan M. R. A., Mamur H., Üstüner M. A., Dilmaç Ö. F. Current and future trend opportunities of thermoelectric generator applications in waste heat recovery. *Gazi University Journal of Science*. 2022. Vol. 35, № 3. P. 896–915. DOI: 10.35378/gujs.934901

14. Gong F., Li H., Huang J., Jing Y., Hu Z., Xia D., Xiao R. Low-grade energy harvesting from dispersed exhaust steam for power generation using a soft biomimetic actuator. *Nano Energy*. 2022. Vol. 91. Article 106677. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106677

15. Chu W., Vicidomini M., Calise F., Duić N., Østergaard P. A., Wang Q., da Graça Carvalho M. Recent advances in technologies, methods, and economic analysis for sustainable development of energy, water, and environment systems. *Energies*. 2022. Vol. 15, № 19. Article 7129. DOI: https://doi.org/10.3390/en15197129

References

1. Pavlovskyi, M. (2024). The improvement of fuel efficiency and environmental characteristics of diesel engine by using biodiesel fuels. In S. Boichenko, A. Zaporozhets, A. Yakovlieva, & I. Shkilniuk (Eds.), *Modern technologies in energy and transport*. Studies in Systems, Decision and Control, vol. 510. Cham: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_4

2. Korostin, O. O. (2025). Approaches to reducing the carbon footprint in training large ML models. *Taurida Scientific Herald. Series: Technical Sciences*, (1), 40–51. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.1.5

3. Chmielarz, P. (2022). Problematyka mediacji w sprawach społecznych i gospodarczych [Problems of mediation in social and economic matters]. *Studia politologica – Political science studies*, 28(370), 45–60. Retrieved from https://studiapolitologica.uken.krakow.pl/article/view/10777 [in Polish].

4. Chmielarz, P. (2023). Analiza bezpieczeństwa energetycznego Rzeczypospolitej Polskiej w zakresie dostaw gazu ziemnego w latach 2015–2021 w powiązaniu z działaniami politycznymi oraz prawnymi [Analysis of Poland's energy security regarding natural gas supply in 2015–2021 in connection with political and legal actions]. *Rocznik integracji europejskiej – Yearbook of european integration*, 17, 197–206. DOI: https://doi.org/10.14746/rie.2023.17.12 [in Polish].

5. Liu, D., Zhao, F. Y., & Tang, G. F. (2010). Active low-grade energy recovery potential for building energy conservation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2736–2747. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.005

6. Ji, D., Liu, G., Romagnoli, A., Rajoo, S., Besagni, G., & Markides, C. N. (2024). Low-grade thermal energy utilization: Technologies and applications. *Applied thermal engineering*, 244, 122618. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122618

7. Chen, W., Huang, Z., & Chua, K. J. (2022). Sustainable energy recovery from thermal processes: A review. *Energy, Sustainability and Society*, 12(46). DOI: https://doi.org/10.1186/s13705-022-00372-2

8. Garofalo, E., Bevione, M., Cecchini, L., Mattiussi, F., & Chiolerio, A. (2020). Waste heat to power: Technologies, current applications, and future potential. *Energy technology*, 8(11), 2000413. DOI: https://doi.org/10.1002/ente.202000413

9. Rossi, M., Jin, L., Monforti Ferrario, A., Di Somma, M., Buonanno, A., Papadimitriou, C., & Comodi, G. (2024). Energy hub and micro-energy hub architecture in integrated local energy communities: Enabling technologies and energy planning tools. *Energies*, 17(19), 4813. DOI: https://doi.org/10.3390/en17194813

10. Ding, C., Zhang, X., Liang, G., & Feng, J. (2024). Optimizing exergy efficiency in integrated energy system: A planning study based on industrial waste heat recovery. *IEEE Access*, 12, 148074–148089. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3468291

11. Noor Akashah, M. H., Mohammad Rozali, N. E., Mahadzir, S., & Liew, P. Y. (2023). Utilization of cold energy from LNG regasification process: A review of current trends. *Processes*, 11(2), 517. DOI: https://doi.org/10.3390/pr11020517

12. Yu, J., Xia, Y., Chen, L., Yan, W., Liu, B., & Jin, S. (2024). Full recovery of brines at normal temperature with process-heat-supplied coupled air-carried evaporating separation (ACES) cycle. *npj Clean water*, 7(1), 133. DOI: https://doi.org/10.1038/s41545-024-00430-6

13. Bhuiyan, M. R. A., Mamur, H., Üstüner, M. A., & Dilmaç, Ö. F. (2022). Current and future trend opportunities of thermoelectric generator applications in waste heat recovery. *Gazi university journal of science*, 35 (3), 896–915. DOI: https://doi.org/10.35378/gujs.934901

14. Gong, F., Li, H., Huang, J., Jing, Y., Hu, Z., Xia, D., & Xiao, R. (2022). Low-grade energy harvesting from dispersed exhaust steam for power generation using a soft biomimetic actuator. *Nano energy*, 91, 106677. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106677

15. Chu, W., Vicidomini, M., Calise, F., Duić, N., Østergaard, P. A., Wang, Q., & da Graça Carvalho, M. (2022). Recent advances in technologies, methods, and economic analysis for sustainable development of energy, water, and environment systems. *Energies*, 15(19), 7129. DOI: https://doi.org/10.3390/en15197129

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 24.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 621.65:629.5.038 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.36

В. І. ХОЛДЕНКО
старший викладач кафедри суднових енергетичних установок
та технічної експлуатації
Навчально-науковий інститут морського флоту
Одеського національного морського університету
ORCID: 0000-0003-0071-7055

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ЗНОС ДЕТАЛЕЙ СУДНОВОГО НАСОСНОГО ОБЛАДНАННЯ

Інтенсивне зношування суднового насосного обладнання в умовах морського середовища, зумовлене дією вібраційних, гідродинамічних, термічних та інерційних навантажень у поєднанні з обмеженим доступом до обслуговування під час рейсів, створює значні ризики для функціональної надійності допоміжних систем, що зумовлює високу актуальність дослідження закономірностей деградації деталей і розроблення ефективних технічних рішень для забезпечення довговічної експлуатації суднових установок. Метою дослідження є комплексна оцінка основних експлуатаційних навантажень, що діють на вузли насосного обладнання суден, виявлення факторів, які пришвидшують знос, та обґрунтування шляхів підвищення ресурсу і надійності насосних систем. У роботі застосовано методи структурного аналізу конструктивних вузлів насосів, спектральний аналіз вібрацій, критичне узагальнення даних вібро-, теплових і гідродинамічних навантажень, а також ризик-орієнтовані підходи до оцінки зносу. Здійснено порівняння впливу різних експлуатаційних режимів на характер деградації деталей. У результаті виконання дослідження систематизовано основні групи навантажень, які критично впливають на довговічність насосного обладнання. Показано, що інтенсивність зносу найбільше зростає під впливом вібраційного розбалансу, кавітації та високих локальних температур. Встановлено ключові точки прискореного зношування – підшипники, ущільнення, лопаті, вали. Обґрунтовано доцільність впровадження систем вібродіагностики, аналізу мастильного середовища, частотного керування приводами та вдосконалення конструкцій деталей. Сформульовано практичні рекомендації щодо впровадження систем віброконтролю, моніторингу стану мастила та використання принципів FMEA-аналізу для обґрунтування переходу до стан-орієнтованої стратегії технічного обслуговування насосного обладнання. Наукова новизна полягає у системному підході до типологізації експлуатаційних навантажень та визначенні їхньої ролі у формуванні зношування на мікрорівні. Практична цінність полягає у формуванні прикладних рекомендацій для підвищення технічного ресурсу насосів без конструктивного втручання, що може бути впроваджено на існуючому флоті.

Ключові слова: *вібраційні навантаження, кавітація, знос вузлів, технічна діагностика, ресурс обладнання, насосні системи, морське середовище.*

V. I. KHOLDENKO
Senior Lector at the Ship Power Plants and Technical Operation Department
Merchant Marine Institute of Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0003-0071-7055

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF OPERATING LOADS ON THE WEAR OF PARTS OF SHIP PUMPING EQUIPMENT

Intensive wear of ship pumping equipment in the marine environment, caused by the action of vibration, hydrodynamic, thermal and inertial loads in combination with limited access to maintenance during voyages, creates significant risks for the functional reliability of auxiliary systems, which makes it highly relevant to study the patterns of degradation of parts and develop effective technical solutions to ensure long-term operation of ship installations. The purpose of the study is a comprehensive assessment of the main operational loads acting on the components of the pumping equipment of ships, identifying factors that accelerate wear, and substantiating ways to increase the resource and reliability of pumping systems. The work uses methods of structural analysis of pump components, spectral analysis of vibrations, critical generalization of vibration, thermal and hydrodynamic load data, as well as risk-based approaches to wear assessment. The impact of different operating modes on the nature of the degradation of parts is compared. As a result of the study, the main groups of loads that critically affect the durability of pumping equipment were systematized. It was shown that the intensity of wear increases most under the influence of vibration imbalance, cavitation and high local temperatures. Key points of accelerated wear were established - bearings, seals, blades, shafts. The feasibility of implementing vibration diagnostics systems, lubricant analysis, frequency control of drives and improving the designs of parts was substantiated. Practical recommendations were formulated for the implementation of vibration control systems, lubricant condition

© Холденко В. І., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

monitoring and the use of FMEA analysis principles to justify the transition to a condition-oriented strategy for technical maintenance of pumping equipment. The scientific novelty lies in the systematic approach to the typology of operational loads and the determination of their role in the formation of wear at the micro level. The practical value lies in the formation of applied recommendations for increasing the technical resource of pumps without constructive intervention, which can be implemented in the existing fleet.

Key words: *vibration loads, cavitation, wear of components, technical diagnostics, equipment life, pumping systems, marine environment.*

Постановка проблеми

Надійність і довговічність суднового насосного обладнання є критичними чинниками для забезпечення стабільної роботи суднових допоміжних систем, зокрема у складних умовах морської експлуатації. Насоси відіграють ключову роль у забезпеченні життєдіяльності судна, включаючи системи охолодження, змащування, осушення та подачі палива. Водночас тривала дія експлуатаційних навантажень, зокрема гідродинамічних імпульсів, вібрацій, термомеханічних деформацій, а також забруднення мастильного середовища, що призводить до інтенсивного зношування деталей насосів, що ставить під загрозу функціонування всієї технічної системи судна.

Сучасні дослідження свідчать про високий рівень впливу вібраційних навантажень на зниження залишкового ресурсу механізмів. Зокрема, дослідники акцентують увагу на критичних граничних рівнях вібрації, перевищення яких істотно прискорює розвиток дефектів і зменшує міжремонтний період експлуатації обладнання [1, с. 127–128]. Водночас, окрім механічних чинників, значну роль у прискоренні зносу відіграють зміни у властивостях мастильного середовища. Використання дистилятних палив із недостатніми змащувальними характеристиками унеможливлює ефективне запобігання фрикційному зносу в насосних парах тертя [2, с. 128–130]. Подібні висновки підтверджуються дослідженнями іноземних науковців. Наприклад, К. Ян (K. Yang) та Т. Чжан (T. Zhang) дослідили вплив нестабільного режиму змащування на знос у суднових підшипниках, підкреслюючи необхідність ретельного аналізу мастил у динамічних умовах [3].

Таким чином, науково-практична проблема полягає в необхідності комплексної оцінки впливу експлуатаційних навантажень на знос деталей суднового насосного обладнання, що передбачає синтез механічних, гідравлічних і трибологічних аспектів. Вирішення цього завдання дозволить суттєво підвищити надійність насосних систем, оптимізувати регламент обслуговування та знизити експлуатаційні витрати.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика зносу деталей суднового насосного обладнання є предметом міждисциплінарних досліджень, що охоплюють механіку, гідравліку, трибологію, вібраційну діагностику та матеріалознавство. Передусім слід відзначити фундаментальні розробки в галузі вібродіагностики суднового обладнання. Так, О. Мельник та В. Сорока розробили комплексну методику оцінки технічного стану головної енергетичної установки на основі аналізу вібраційних характеристик, що дозволяє своєчасно виявляти передумови до зносу та зниження ресурсу агрегатів [4].

Серед міжнародних праць заслуговує уваги дослідження М. Парк (M. Park) зі співавторами, де розглянуто сучасні методи зниження вібрацій у морських установках, зокрема демпфування, ізоляцію джерел шуму та конструктивне вдосконалення [5]. Хоча основна увага приділена двигунам, отримані висновки можуть бути адаптовані й до насосного обладнання. Вагомі результати також подано у роботі В. Цао (W. Cao), Х. Ванга (H. Wang) та Дж. Танга (J. Tang), які за допомогою CFD–DEM моделювання довели, що ерозія та кавітація деформують напрямні лопатки відцентрових насосів уже на ранніх етапах експлуатації [6]. У питанні вибору матеріалів для підвищення зносостійкості насосних вузлів, Х. Ванга (H. Wang) зі співавторами звертають увагу на комбінацію поверхневого зміцнення, модифікації фрикційних пар та альтернативних мастил, пропонуючи перспективні підходи для покращення ресурсу аксіальних поршневих насосів [7]. Особливу увагу варто приділити дослідженням з аналізу якості мастильного середовища: С. Сагін, С. Бондар і Т. Столярик у своєму дослідженні встановили зв’язок між показниками моторного мастила та безвідмовністю дизельних агрегатів, наголошуючи на діагностичному потенціалі аналізу оливи [8].

Серед прикладних досліджень варто відзначити роботу В. Чимшира, де розглядається експлуатація транспортних систем, зокрема насосів, з акцентом на оптимізацію технічного обслуговування та енергоефективність, хоча питання зношування висвітлено побіжно [9]. Натомість А. Кононенко та В. Слабко підкреслюють роль безперервної освіти у формуванні фахових навичок суднових механіків, що прямо впливає на якість догляду за насосами в складних умовах [10].

Щодо ризик-орієнтованих підходів, Б. Цейлан (B. Ceylan) зі співавторами пропонують застосування методу FMEA та ERS для оцінки впливу обростання морських систем на технічну справність обладнання, включаючи насоси – це дослідження розкриває важливість системного аналізу ризиків в умовах морського середовища [11]. Праця В. Шеня (W. Shen) зі співавторами фокусуються на моделюванні ризиків пошкодження трубопроводів та обладнання під час стоянки танкерів біля причалу, акцентуючи на важливості динамічної оцінки експлуатаційного навантаження у прикордонних режимах [12]. Хоча насосне обладнання не є основним об’єктом

розгляду, підхід до аналізу лінійної відмови може бути адаптований до оцінки вразливості насосних систем у подібних умовах.

Автори Х. Гаріб (H. Gharib) та Г. Ковач (G. Kovacs), що порівнюють надійність морських та промислових дизельних двигунів, непрямо підтверджують більшу вразливість морських агрегатів до дії змінного навантаження та корозійних чинників, що може бути екстрапольовано й на насосне обладнання [13]. Варто відзначити, що Г. Коцак (G. Kocak) зі співавторами демонструють, як інтелектуальні методи здатні ідентифікувати дефекти ще до їх прояву в традиційних індикаторах, однак акцент зроблено переважно на дизелях, що обмежує застосування підходу до насосів [14].

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є комплексна оцінка впливу експлуатаційних навантажень на процеси зношування основних деталей суднового насосного обладнання, з урахуванням характеру вібраційних, гідродинамічних і трибологічних факторів в умовах морської експлуатації. Для досягнення поставленої мети у дослідженні визначено такі завдання:

1. Дослідити характер експлуатаційних навантажень, що виникають у роботі суднових насосів, із виокремленням критичних параметрів, які мають найбільший вплив на знос елементів насосного обладнання.
2. Проаналізувати закономірності розвитку зношування деталей насосних агрегатів під дією вібраційних, гідродинамічних та теплових навантажень, а також властивостей мастильного середовища.
3. Виявити напрямки підвищення надійності та ресурсу суднового насосного обладнання шляхом формування рекомендацій щодо оптимізації режимів експлуатації, діагностики стану та покращення умов змащування.

Викладення основного матеріалу дослідження

Основними видами навантажень, що діють на деталі суднових насосів у процесі експлуатації, є механічні вібрації, гідродинамічні імпульси потоку, теплові деформації, а також вплив зовнішнього морського середовища. Вібраційні навантаження виникають через дисбаланс та пульсації від роботи двигунів і самого насоса, передаючись на корпус і вузли. Дослідження показують, що перевищення критичних рівнів вібрації різко прискорює розвиток дефектів і скорочує міжремонтний ресурс обладнання [1, с. 127–128]. Важливо відзначити, що на знос впливають не лише амплітуди коливань, а й їх спектральний склад – резонансні частоти можуть спричиняти локальні перевантаження конструкції.

Гідродинамічні навантаження виникають через пульсації тиску, гідроудари та кавітацію, що спричиняють ерозійне пошкодження лопатей і корпусу. CFD–DEM моделювання підтверджує, що поєднання кавітації та твердих часток прискорює знос поверхонь [6]. Ключовими чинниками гідравлічного навантаження є низький тиск на вході (NPSH) і вміст абразивів. Теплові навантаження зумовлені перепадами температур через часті пуски чи гарячі рідини, що викликає деформації і додаткове тертя. Стабілізація температурного режиму, зокрема шляхом регулювання обертів вентиляторів, зменшує тепловий стрес [15, с. 253–255]. Зовнішні чинники, такі як морська качка та заростання захисних решіток у водозабірних камерах (sea chest) суден, викликають інерційні навантаження і провокують кавітацію. Це впливає на справність насосів і має враховуватись у розрахунках надійності [11, с. 416–418]. Додаткові пікові навантаження можливі при стоянці суден – хвильова дія змінює тиск у трубопроводах. Як показано в [12], аналіз динамічних режимів корисний і для оцінки роботи насосів в екстремальних умовах.

Отже, до критичних параметрів експлуатаційних впливів, що найбільше впливають на інтенсивність зношування насосів, належать рівні вібрації та їх частотний спектр, наявність кавітації і твердих домішок у робочій рідині різкі перепади навантаження при нестаціонарних режимах, а також фактори середовища (корозійність морської води, обростання). Для наочного узагальнення ці фактори сформовано у табл. 1.

Процеси зношування деталей насосного обладнання мають комплексний характер і зумовлені дією вібрацій, гідродинамічних, термічних і корозійних навантажень. Вібраційна втома призводить до зародження мікротріщин у зонах підвищених напружень, що згодом об’єднуються, спричиняючи пошкодження елементів конструкції [1, с. 127–128]. Ерозійно-абразивний знос виникає при наявності твердих часток у рідині, які викликають вибивання металу на передніх крайках лопаток і внутрішніх стінках корпусу [6]. Кавітація спричиняє точкові руйнування поверхонь через схлопування бульбашок, що порушує профіль лопаток і знижує продуктивність насоса.

Теплові навантаження викликають термомеханічну втому, зокрема тріщиноутворення у зонах локального нагріву, таких як підшипники ковзання. Адгезійне зношування спостерігається у парах тертя при нестабільному мастильному режимі – на поверхнях утворюються задири та сліди граничного тертя [2, с. 128–130; 3]. Згідно з дослідженням [8], вміст металевих часток у мастилі прямо корелює з інтенсивністю зносу. Додатковий ризик становить корозійна деградація у морському середовищі, що підсилює втомне та абразивне зношування [13, с. 327–330]. Таким чином, одночасна дія кількох факторів зумовлює поступове накопичення пошкоджень, що можна діагностувати на ранніх стадіях за допомогою аналізу мастил або віброконтролю. Для систематизації основних механізмів зношування та відповідних причинних факторів їх наведено у табл. 2.

Підвищення довговічності суднових насосів потребує комплексного підходу, що включає оптимізацію режимів роботи, удосконалення систем діагностики, поліпшення умов змащування, а також використання сучасних

Таблиця 1

Основні експлуатаційні навантаження на насосне обладнання та критичні параметри їх впливу

Вид навантаження	Характер впливу на насос	Критичні параметри (граничні значення)
Вібраційні навантаження	Періодичні коливання корпусу і вузлів насоса від обертання валу, дисбалансу або передавані від двигуна. Спричиняють циклічні напруження в матеріалах	Амплітуда віброприскорення чи швидкості понад норму (перевищення порогів ISO); резонансні частоти, що збігаються з власними частотами конструкції
Гідродинамічні імпульси	Різкі коливання тиску і витрати в проточній частині насоса (пульсації, гідроудари). Викликають ударні навантаження на лопаті, корпус і трубопроводи	Стрімке збільшення тиску (гідроудар > 10–1510–15 МПа у системах охолодження); амплітуда тискових пульсацій; швидкість закриття клапанів
Кавітація потоку	Утворення парових бульбашок при зниженні тиску на вході та їх схлопування з ударним ефектом. Призводить до ерозії металу деталей насоса	Зниження тиску на всмоктуванні нижче критичного NPSH; інтенсивність кавітації (кількість схлопувань за секунду). Довготривала кавітація неприпустима
Теплові навантаження	Нагрівання і охолодження деталей насоса при роботі (особливо на гарячих рідинах) спричиняє температурні деформації, зміну зазорів	Температура перекачуваної рідини (°C) – перевищення робочого діапазону; градієнт температур між вузлами; кількість теплових циклів «пуск-стоп»
Зовнішні фактори середовища	Морська хитавиця та удари корпусу спричиняють додаткові динамічні навантаження; солона вода і біологічне обростання викликають корозію та утруднення подачі	Амплітуда кутових коливань судна (°) і прискорення, що діє на агрегат; ступінь обростання забірних ґрат (% площі); концентрація солей і агресивність середовища (pH, хлориди)

Джерело: сформовано автором на основі даних [1, с. 127–128; 6; 11, с. 416–418; 12; 15, с. 253–255]

Таблиця 2

Основні механізми зношування деталей насосів та чинники, що їх обумовлюють

Вид зношування (механізм)	Причинні експлуатаційні фактори	Характерні прояви та наслідки зносу
Втомне руйнування матеріалу	Циклічні механічні навантаження: вібрації, пульсації тиску, удари; часті пуски/зупинки насоса.	Мікротріщини, що ростуть. Ризик раптового руйнування лопаток, вала, корпусу
Абразивно-ерозійний знос	Тверді частки у перекачуваній рідині (піщинки, окалина); кавітаційні явища при низькому тиску на вході; забруднення мастила твердими домішками	Втрата матеріалу на лопатках і корпусі, каверни, зниження ККД через шорсткість.
Адгезійний (фрикційний) знос	Недостатнє змащування пар тертя: низька якість палива/оливи, зниження рівня чи тиску мастила; перегрів вузлів; робота «на суху»	Задири, подряпини, перегрів, потемніння оливи, зростання зазорів, ризик заклинювання
Корозійне спрацювання	Агресивне середовище: дія морської води, електрохімічна корозія в присутності струмів; високотемпературна корозія при нагрітій рідині	Виїмки, рівномірне тонке спрацювання, ослаблення міцності, поєднання з вібраціями

Джерело: сформовано автором на основі даних [1, с. 127–128; 2, с. 128–130; 3; 6; 8; 13, с. 327–330]

матеріалів і конструкцій. Одним із ключових напрямів є зниження шкідливих навантажень: балансування ротора, центрування агрегатів, встановлення демпфуючих елементів дозволяє зменшити вібрації. Впровадження частотно-регульованих приводів запобігає гідроударам і кавітації, сприяючи стабільній роботі насосів. Діагностика технічного стану, зокрема віброконтроль і аналіз мастильного середовища, дає змогу виявити ознаки зносу ще до появи відмов. Застосування інтелектуальних методів, описаних у [14], дозволяє будувати системи прогнозування на основі сенсорних даних. Ризик-орієнтовані стратегії техобслуговування (FMEA) дозволяють зосередити контроль на найбільш уразливих елементах.

Не менш важливим є забезпечення ефективного змащування: використання якісних мастильних матеріалів і регулярний аналіз їх стану дозволяє мінімізувати адгезійний знос. Технічні рішення включають нанесення зносостійких покриттів, підбір матеріалів пар тертя, а також оптимізацію конструкції насосів задля зменшення кавітації та вібрацій [7]. Високу роль відіграє підготовка персоналу: кваліфіковані механіки здатні рано виявити аномалії в роботі обладнання, запобігаючи серйозним відмовам. Освітні програми та інструктажі з правил експлуатації і діагностики є невід'ємним чинником надійності насосних систем.

В сукупності запропоновані заходи забезпечують синергетичний ефект, дозволяючи мінімізувати вплив експлуатаційних навантажень на вузли насосів і реалізувати їх потенційний ресурс повною мірою.

Висновки

У результаті проведеного дослідження отримано обґрунтовані висновки, які відображають комплексне розуміння характеру експлуатаційних навантажень, механізмів зношування деталей насосного обладнання та дозволяють сформулювати технічно доцільні підходи до підвищення його надійності й ресурсу. По-перше, в результаті виконання першого завдання систематизовано експлуатаційні навантаження, які чинять критичний вплив на вузли насосного обладнання: до них віднесено вібраційні коливання, динаміку гідравлічних параметрів, перепади температури, а також властивості мастильного середовища, що безпосередньо впливають на інтенсивність зносу. По-друге, у межах другого завдання досліджено основні закономірності формування пошкоджень у тертьових парах, зокрема розвиток втомних тріщин, кавітаційного руйнування, задирів та абразивного спрацювання. На основі аналізу практичних випадків виявлено, що нестабільні режими роботи, недостатній контроль мастила та

вплив гідродинамічних навантажень є основними причинами передчасного зношування. По-третє, при виконанні третього завдання розроблено і обґрунтовано комплекс технічних і організаційних заходів щодо підвищення надійності насосів, до яких належать: впровадження вібраційної та мастильної діагностики, застосування антивібраційних рішень, оптимізація режимів експлуатації, використання зносостійких матеріалів та вдосконалення систем обслуговування на основі технічного стану.

Отримані результати мають значну практичну цінність для впровадження в експлуатаційну практику морського транспорту, зокрема в системах технічного менеджменту допоміжного обладнання. Наукова новизна роботи полягає в комплексному аналізі сукупної дії навантажувальних чинників на динаміку зношування насосів та узагальненні ефективних засобів його мінімізації. Перспективами подальших досліджень є створення цифрових моделей прогнозування ресурсу насосного обладнання, розробка інтелектуальних систем діагностики та адаптивного управління режимами роботи насосів на основі аналізу сенсорних даних у реальному часі.

Список використаної літератури

1. Свиридов В., Андреєв А., Андрєєв А. Аналіз впливу граничних рівнів вібрації на залишковий ресурс суднових машин і механізмів. *Розвиток транспорту*. 2023. № 4 (19). С. 125–139. URL: https://doi.org/10.33082/td.2023.4-19.10 (дата звернення: 15.06.2025).

2. Сорока В., Мельник О., Довгаль І. Математична модель оцінювання змащувальної здатності суднових дистилятних палив. *Водний транспорт*. 2023. № 2 (36). С. 120–134. URL: https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.36.10 (дата звернення: 15.06.2025).

3. Yang K., Zhang T. Lubrication analysis of stern bearing during ship severe turning maneuver. *Wear*. 2023. Vol. 523. Article 204734. URL: https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204734 (дата звернення: 15.06.2025).

4. Мельник О., Сорока В. Вібродіагностика головної енергетичної установки суден: вдосконалення та інтеграція методів. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2023. № 47. С. 349–359. URL: https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300121 (дата звернення: 15.06.2025).

5. Review of noise and vibration reduction technologies in marine machinery: Operational insights and engineering experience / M. Park et al. *Applied Ocean Research*. 2024. Vol. 152. Article 104195. URL: https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104195 (дата звернення: 15.06.2025).

6. Cao W., Wang H., Tang J. Study on wear characteristics of a guide vane centrifugal pump based on CFD–DEM. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12. No. 4. Article 593. URL: https://doi.org/10.3390/jmse12040593 (дата звернення: 15.06.2025).

7. Structural improvement, material selection and surface treatment for improved tribological performance of friction pairs in axial piston pumps: A review / H. Wang et al. *Tribology International*. 2024. Vol. 198. Article 109838. URL: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109838 (дата звернення: 15.06.2025).

8. Сагін С., Бондар С., Столярик Т. Оцінка безвідмовності суднових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення. *Водний транспорт*. 2023. № 1 (37). С. 59–70. URL: http://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06 (дата звернення: 15.06.2025).

9. Чимшир В. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту: колективна монографія. *Ізмаїл: Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»*. 2020. 472 с. URL: https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/monografia2020.pdf (дата звернення: 15.06.2025).

10. Кононенко А., Слабко В. Реалізація неперервної освіти в процесі формування професійної компетентності майбутніх суднових механіків. *Науковий часопис. Серія 5. Педагогічні науки: реалії та перспективи*. 2024. № 101. С. 20–25. URL: https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series5.2024.101.04 (дата звернення: 15.06.2025).

11. Risk assessment of sea chest fouling on the ship machinery systems by using both FMEA method and ERS process / B. Ceylan et al. *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*. 2023. Vol. 15. No. 4. P. 414–433. URL: https://doi.org/10.1080/18366503.2022.2104494 (дата звернення: 15.06.2025).

12. Operability analysis and line failure risk assessment for a tanker moored at berth / W. Shen et al. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 300. Article 117439. URL: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117439 (дата звернення: 15.06.2025).

13. Gharib H., Kovacs G. Reliability analysis of marine diesel engines vs. industrial diesel engines: a comparative approach. *Acta Logistica*. 2024. Vol. 11. No. 2. P. 325–337. URL: https://doi.org/10.22306/al.v11i2.516 (дата звернення: 15.06.2025).

14. Kocak G., Gokcek V., Genc Y. Condition monitoring and fault diagnosis of a marine diesel engine with machine learning techniques. *Pomorstvo*. 2023. Vol. 37. No. 1. P. 32–46. URL: https://doi.org/10.31217/p.37.1.4 (дата звернення: 15.06.2025).

15. İnal Ö., Koçak G. A case study on the variable frequency drive for ship engine room ventilation. *Marine Science and Technology Bulletin*. 2023. Vol. 12. No. 3. P. 252–258. URL: https://doi.org/10.33714/masteb.1299692 (дата звернення: 15.06.2025).

References

1. Svyrydov, V., Andreev, A., & Andriiev, A. (2023). Analiz vplyvu hranichnykh rivniv vibratsii na zalyshkovyi resurs sudnovykh mashyn i mekhanizmiv. [Analysis of the impact of limit vibration levels on the residual life of ship machinery and mechanisms]. *Rozvytok transportu – Transport Development*, 4(19), 125–139. Retrieved from https://doi.org/10.33082/td.2023.4-19.10 [in Ukrainian].

2. Soroka, V., Melnyk, O., & Dovhal, I. (2023). Matematychna model otsiniuvannia zmashchuvalnoi zdatnosti sudnovykh dystyliatnykh palyv. [Mathematical model for assessing the lubricating ability of marine distillate fuels]. *Vodnyi transport – Water Transport*, 2(36), 120–134. Retrieved from https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.36.10 [in Ukrainian].

3. Yang, K., & Zhang, T. (2023). Lubrication analysis of stern bearing during ship severe turning maneuver. *Wear*, 523, Article 204734. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.204734 [in English].

4. Melnyk, O., & Soroka, V. (2023). Vibrodiahnostyka holovnoi enerhetychnoi ustanovky suden: vdoskonalennia ta intehratsiia metodiv. [Vibration diagnostics of ship main power plants: improvement and integration of methods]. *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnoho Tekhnichnoho Universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky – Bulletin of the Azov State Technical University. Series: Technical Sciences*, 47, 349–359. https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300121 [in Ukrainian].

5. Park, M., Yeo, S., Choi, J., & Lee, W. (2024). Review of noise and vibration reduction technologies in marine machinery: Operational insights and engineering experience. *Applied Ocean Research*, 152, Article 104195. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104195 [in English].

6. Cao, W., Wang, H., & Tang, J. (2024). Study on wear characteristics of a guide vane centrifugal pump based on CFD–DEM. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(4), Article 593. Retrieved from https://doi.org/10.3390/jmse12040593 [in English].

7. Wang, H., Lin, N., Yuan, S., Liu, Z., Yu, Y., Zeng, Q., Fan, J., Li, D., & Wu, Y. (2024). Structural improvement, material selection and surface treatment for improved tribological performance of friction pairs in axial piston pumps: A review. *Tribology International*, 198, Article 109838. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109838 [in English].

8. Sahin, S., Bondar, S., & Stolyaryk, T. (2023). Otsinka bezvidmovnosti sudnovykh dyzeliv za tekhnichnym stanom mastyla tsyrkuliatsiinykh system mashchennia. [Assessment of the reliability of marine diesel engines based on the condition of lubricating oil in circulation systems]. *Vodnyi transport – Water Transport*, 1(37), 59–70. Retrieved from https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06 [in Ukrainian].

9. Chymshyr, V. (2020). Suchasni pidkhody do vysokoeffektyvnoho vykorystannia zasobiv transportu: kolektyvna monohrafiia. [Modern approaches to the efficient use of transport means: Collective monograph]. *Izmail: Dunaiskyi Instytut Natsionalnoho Universytetu «Odeska Morska Akademiia» – Izmail: Danube Institute of the National University "Odesa Maritime Academy"*, Article 472. Retrieved from https://dinuoma.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/monografia2020.pdf [in Ukrainian].

10. Kononenko, A., & Slabko, V. (2024). Realizatsiia neperervnoi osvity v protsesi formuvannia profesiinoi kompetentnosti maibutnikh sudnovykh mekhanikiv. [Implementation of lifelong learning in the process of forming professional competence of future marine engineers]. *Naukovyi chasopys. Seriia 5. Pedahohichni nauky: realii ta perspektyvy – Scientific Bulletin. Series 5. Pedagogical Sciences: Realities and Prospects*, 101, 20–25. Retrieved from https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series5.2024.101.04 [in Ukrainian].

11. Ceylan, B., Karatuğ, Ç., Ejder, E., Uyanık, T., & Arslanoğlu, Y. (2023). Risk assessment of sea chest fouling on the ship machinery systems by using both FMEA method and ERS process. *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*, 15(4), 414–433. Retrieved from https://doi.org/10.1080/18366503.2022.2104494 [in English].

12. Shen, W., Hu, J., Liu, L., & Chen, H. (2024). Operability analysis and line failure risk assessment for a tanker moored at berth. *Ocean Engineering*, 300, Article 117439. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117439 [in English].

13. Gharib, H., & Kovacs, G. (2024). Reliability analysis of marine diesel engines vs. industrial diesel engines: A comparative approach. *Acta Logistica*, 11(2), 325–337. Retrieved from https://doi.org/10.22306/al.v11i2.516 [in English].

14. Kocak, G., Gokcek, V., & Genc, Y. (2023). Condition monitoring and fault diagnosis of a marine diesel engine with machine learning techniques. *Pomorstvo*, 37(1), 32–46. Retrieved from https://doi.org/10.31217/p.37.1.4 [in English].

15. İnal, Ö., & Koçak, G. (2023). A case study on the variable frequency drive for ship engine room ventilation. *Marine Science and Technology Bulletin*, 12(3), 252–258. Retrieved from https://doi.org/10.33714/masteb.1299692 [in English].

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 620.178.3:620.193:004.94 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.37

Ю. Ф. ХОЛОДНИЙ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій
Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук
ORCID: 0009-0009-6695-8258

В. О. ЖОВТОБРЮХ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій
Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук
ORCID: 0009-0007-2438-6082

Р. О. ІВАНЕНКО
старший науковий співробітник
Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки
та судових експертиз
ORCID: 0000-0002-1447-6275

МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ

Актуальність дослідження полягає в необхідності підвищення надійності та збільшення ресурсу сучасних конструкцій, що експлуатуються у складних умовах динамічних навантажень і впливів навколишнього середовища. Установлено, що традиційні підходи до розрахунку не завжди адекватно враховують нелінійні ефекти, стохастичний характер навантажень і багатофакторні процеси деградації матеріалів, внаслідок чого відбуваються передчасні відмови і знижується ефективність використання технічних систем. Це визначає потребу у розробленні нових підходів до моделювання механічних систем, здатних відтворювати реальні умови експлуатації та забезпечувати достовірність прогнозування довговічності.

Мета статті полягає у формуванні науково обґрунтованих підходів до моделювання механічних систем із урахуванням реальних режимів роботи для підвищення їхньої довговічності та функціональної надійності.

Методологія дослідження базується на системному аналізі експлуатаційних режимів і динамічних навантажень, узагальненні сучасних чисельних методів, зокрема методу скінченних елементів і методу скінченних різниць, а також на використанні алгоритмів машинного навчання та концепції цифрових двійників. Застосовано методи порівняльного аналізу, моделювання напружено-деформованого стану та оцінки деградаційних процесів, що забезпечує комплексність отриманих результатів.

Результати дослідження полягають у виявленні основних експлуатаційних чинників, що визначають довговічність конструкцій, систематизації методів моделювання та обґрунтуванні їх ефективності у прогнозуванні ресурсу. Досліджено вплив факторів навколишнього середовища, таких як корозія, термоцикли, зношування і радіаційне випромінювання, на поступову деградацію матеріалів. Виявлено основні проблеми, що обмежують точність і практичну реалізацію моделей, зокрема нестачу якісних вихідних даних, складність опису мультифізичних процесів і відсутність уніфікованих стандартів.

Висновки підтверджують, що створення багаторівневих моделей, інтегрованих із натурними випробуваннями та сенсорним моніторингом, дозволяє підвищити точність прогнозування ресурсу та запобігати передчасним відмовам конструкцій. Рекомендовано враховувати дефекти виробництва й монтажу, застосовувати неруйнівний контроль та формувати єдині методичні стандарти.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням адаптивних мультифізичних моделей, призначених для роботи з неповними або стохастичними даними, розвитком алгоритмів штучного інтелекту для аналізу великих масивів експлуатаційної інформації та створенням цифрових платформ для уніфікованої оцінки довговічності у різних галузях техніки.

Ключові слова: *надійність матеріалів, процеси втоми матеріалів,, цифрові двійники, машинне навчання, прогнозування ресурсу, мультифізичне моделювання, сенсорний моніторинг.*

© Холодний Ю. Ф., Жовтобрюх В. О., Іваненко Р. О., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

YU. F. KHOLODNYI
PhD in Engineering,
Associate Professor at the Department of Motor Transport
and Transport Technologies
Branch of the Classical Private University in Kremenchuk
ORCID: 0009-0009-6695-8258

V. O. ZHOVTOBRYUKH
PhD in Engineering,
Associate Professor at the Department of Motor Transport
and Transport Technologies
Branch of the Classical Private University in Kremenchuk
ORCID: 0009-0007-2438-6082

R. O. IVANENKO
Senior Research Scientist
Ukrainian Scientific Research Institute of Special Equipment
and Forensic Expertise
ORCID: 0000-0002-1447-6275

MODELING OF MECHANICAL SYSTEMS TO IMPROVE THE DURABILITY OF STRUCTURES

The relevance of this study lies in the need to enhance the reliability and extend the service life of modern structures operating under complex conditions of dynamic loads and environmental influences. It has been established that traditional calculation methods do not always adequately account for nonlinear effects, the stochastic nature of loads, and the multifactorial processes of material degradation. As a result, premature failures occur, and the efficiency of technical systems decreases. This underscores the necessity of developing new approaches to modeling mechanical systems that can replicate real operating conditions and ensure the reliability of durability forecasts.

The purpose of this article is to develop scientifically grounded approaches to modeling mechanical systems that take into account actual operating regimes, thereby increasing their durability and functional reliability.

The research methodology is based on a systematic analysis of operating conditions and dynamic loads, the generalization of modern numerical methods, including the finite element method and the finite difference method, as well as the use of machine learning algorithms and the concept of digital twins. Methods of comparative analysis, stress–strain state modeling, and degradation process assessment were applied, ensuring the comprehensiveness of the results obtained.

The findings of the study include the identification of key operational factors that determine the durability of structures, the systematization of modeling methods, and the substantiation of their effectiveness in predicting service life. The impact of environmental factors such as corrosion, thermal cycling, wear, and radiation exposure on the gradual degradation of materials was investigated. The study revealed critical challenges limiting the accuracy and practical implementation of models, including insufficient quality of input data, the complexity of describing multiphysics processes, and the lack of unified standards.

The conclusions confirm that the development of multilevel models integrated with full-scale testing and sensor-based monitoring improves the accuracy of service life prediction and helps prevent premature structural failures. It is recommended to account for manufacturing and assembly defects, apply non-destructive testing, and establish unified methodological standards.

Future research should focus on improving adaptive multiphysics models designed to operate with incomplete or stochastic data, developing artificial intelligence algorithms for analyzing large volumes of operational information, and creating digital platforms for unified durability assessment across different engineering domains.

Key words: *material reliability, fatigue processes, digital twins, machine learning, service life prediction, multiphysics modeling, sensor monitoring.*

Постановка проблеми

Моделювання механічних систем з метою підвищення довговічності конструкцій є одним із основних напрямів сучасної інженерної науки, оскільки воно поєднує фундаментальні положення механіки матеріалів і прикладні завдання конструкторської практики. Проблема полягає у тому, що реальні експлуатаційні умови характеризуються змінними навантаженнями, впливом середовища та процесами втоми, які знижують надійність і призводять до передчасних відмов. Традиційні підходи до розрахунку не завжди враховують нелінійні ефекти, стохастичний характер навантажень та складні механізми руйнування, що зумовлює потребу у використанні математичного та комп'ютерного моделювання для створення більш точних прогнозів. Наукове значення проблеми полягає у необхідності розроблення узагальнених моделей, які дозволяють описати еволюцію пошкоджуваності матеріалів і визначити критичні режими їхньої роботи, тоді як практична сфера вимагає формування інструментарію для

підвищення ресурсу й оптимізації конструкцій з урахуванням вимог енергоефективності та економічної доцільності. Таким чином, завдання дослідження має стратегічне значення як для розвитку теоретичної бази механіки, так і для вдосконалення інженерних рішень у машинобудуванні, будівництві та авіакосмічній галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У дослідженнях із моделювання механічних систем для підвищення довговічності конструкцій доцільно виокремити чотири взаємопов'язані напрями. Перший напрям охоплює вивчення експлуатаційних режимів, паливно-теплових впливів та впливів навколишнього середовища на деградацію матеріалів, що формують вихідні умови моделювання ресурсу. М. Павловський (M. Pavlovskyi) показує, що перехід на біодизельні суміші змінює індикаторні діаграми і теплові поля дизельних агрегатів, знижує токсичність та потенційно пом'якшує термо-механічні навантаження на елементи приводів, що відображається на траєкторіях деградації [1].

О. О. Коростін (O. O. Korostin) обґрунтовує підходи до зменшення вуглецевого сліду обчислювально інтенсивних конвеєрів машинного навчання (далі – ML-конвеєрів), що безпосередньо релевантно масштабуванню цифрових близнюків і онлайн-аналітики стану для оцінювання довговічності [2].

Ю. Максимюк (Yu. Maksymiuk), О. Авдійчук (O. Avdiichuk), Д. Лук'янчук (D. Lukianchuk) демонструють, що раннє моделювання динамічних режимів у проєктуванні промислових конструкцій зменшує невизначеність резонансів і навантажувальних сценаріїв, створюючи коректні вхідні дані для ресурсних оцінок і проєктування з урахуванням надійності [3].

О. Є. Андрейків (O. Ye. Andreikiv), І. Я. Долінська (I. Ya. Dolinska), С. В. Настасяк (S. V. Nastasiak) доводять, що тривале розтягнення у водневмісних середовищах істотно прискорює прогресування систем тріщин у металах і зумовлює необхідність врахування водневої крихкості у параметрах моделей втоми та фрагментації [4]. Виходячи з цього, для точного прогнозування ресурсного стану доцільно формалізувати зв'язок «паливно-експлуатаційна стратегія → спектр навантажень → параметри деградації» у цифрових близнюках і розробити стандартизовані протоколи карбон-обліку обчислень у реальному часі.

Другий напрям досліджень присвячено методологіям забезпечення надійності, часу-залежної деградації та інтеграції з політиками технічного обслуговування. Г. Кумар (G. Kumar), В. Джейн (V. Jain), У. С. Соні (U. S. Soni) розробляють формалізм моделювання/імітації ремонтованих систем з урахуванням відмов, ремонтів і доступності, що дозволяє узгоджувати експлуатаційні рішення з логістикою запасних частин [5]. Д. Менг та співавтори (D. Meng et al.), З. Лв (Z. Lv), С. Ян (S. Yang) впроваджують модель часово-змінної надійності, яка ґрунтується на траєкторіях деградації показників працездатності та має критичне значення для моделювання повільних пошкоджень і стохастичної еволюції параметрів конструкцій. [6]. М. Александер (M. Alexander), Х. Бойсхаузен (H. Beushausen) критично аналізують підходи до прогнозування терміну експлуатаційної придатності залізобетонних елементів, висвітлюючи основні чинники невизначеності транспортних процесів та впливів середовища, які необхідно враховувати у верифікованих моделях довговічності [7]. В. Кааль (W. Kaal), Й. Баумгартнер (J. Baumgartner), М. Буднік та співавтори (M. Budnik et al.) пропонують чисельні схеми оптимізації динамічної поведінки з безпосереднім урахуванням критеріїв втоми/ушкоджуваності, що дозволяє інтегрувати завдання надійності з проблемами оптимального проєктування. [8]. У цьому напрямі доцільно поєднати детерміністичну механіку пошкоджуваності з імовірнісними LCC-рамками, каліброваними на основі польових даних, а також включити політики обслуговування у багатокритеріальні оптимізації «надійність–ризик–вартість».

Дослідження у межах третього напряму зосереджуються на цифрових репрезентаціях деградації, екстремальних впливах і матеріалознавчих інтервенціях. К. Фенг (K. Feng), Дж. С. Джі (J. C. Ji), Й. Чжан та співавтори (Y. Zhang et al.) реалізують цифрового близнюка для інтелектуальної оцінки поверхневої деградації зубчастих коліс, поєднуючи сенсорні дані з моделями механізмів зношування для планування втручань [9]. В. Кодур (V. Kodur), С. Банержі (S. Banerji) моделюють вогневий відкол у бетоні як результат взаємодії гідро-термо-механічних напружень, пропонуючи прогностичні критерії катастрофічних пошкоджень у пожежних сценаріях [10]. Л. Коппола (L. Coppola), С. Беретта (S. Beretta), М. С. Біньоцці та співавтори (M. C. Bignozzi et al.) узагальнюють підходи до підвищення довговічності залізобетону – від модифікацій складів і інгібіторів корозії до самовідновних матриць – у координатах сталості конструкцій [11]. Отримані узагальнення вказують на потребу у створенні крос-масштабних моделей, що поєднують перенесення вологи/газів і термічні поля з механікою руйнування, та довготривалі валідаційні програми на реальних об'єктах.

Четвертий напрям досліджень поєднує стратегії управління життєвим циклом, структурний моніторинг, прикладні методики прогнозування ресурсу та методологічний контроль ML-аналітики. Д. М. Франгопол (D. M. Frangopol), М. Соліман (M. Soliman) визначають управління життєвим циклом конструкцій із балансуванням ризику, вартості та надійності як основу для оптимізації інтервенцій протягом експлуатації [12]. А. Гуемес (A. Güemes), А. Фернандес-Лопес (A. Fernandez-Lopez), А. Р. Позо та співавтори (A. R. Pozo et al.) систематизуютьSHM-підходи до композитів, підкреслюючи значення інтегрованих сенсорів, хвилеводів і алгоритмів інверсії сигналів для раннього виявлення пошкоджень [13]. А. Панда (A. Panda), В. Нагорний (V. Nahornyi), І. Пандова та співавтори (I. Pandová et al.) пропонують прикладну методику прогнозування ресурсу механічних систем, орієнтовану на вимірювані експлуатаційні

ознаки і технологічну придатність до впровадження [14]. Т. Гренсфельдер (T. Groensfelder), Ф. Гібелер (F. Giebeler), М. Гойпель та співавтори (M. Geupel et al.) виявляють потенційні можливості й обмеження ML-процедур у моделюванні механічних систем, акцентуючи увагу на ризиках перенавчання, зміщення даних і втрати фізичної інтерпретованості – критичних для надійності ресурсних прогнозів [15]. M. Pavlovskyi узагальнює результати застосування біодизельних палив у дизельних двигунах, підкреслюючи значення оптимізації паливної ефективності та екологічних характеристик для управління ресурсом механічних систем і формування інтегрованих стратегій життєвого циклу [16]. На основі цих висновків оцільно стандартизувати SHM-протоколи і відкриті бенчмарки, що поєднують physics-informed та data-driven підходи з урахуванням карбон-обмежень обчислень, а також забезпечити трасованість моделей від сенсора до рішення життєвого циклу.

Попри значний прогрес у вивченні довговічності конструкцій, залишаються невирішеними кілька основних аспектів. Недостатньо досліджено вплив змінних експлуатаційних режимів і комбінованих динамічних навантажень, не отримано достатньо даних щодо реального впливу реальний вплив чинників середовища на довготривалу деградацію матеріалів. Сучасні методи моделювання демонструють ефективність у прогнозуванні ресурсу, проте їх точність обмежується недостатністю якісних даних, складністю опису мультифізичних процесів і відсутністю єдиних методологічних стандартів, що ускладнює практичну інтеграцію моделей.

Дослідження передбачає усунення цих недоліків шляхом створення комплексних підходів, які поєднують математичне моделювання, сенсорний моніторинг та інтелектуальний аналіз даних. Використання цифрових близнюків і методів машинного навчання дозволяє відтворювати реальні сценарії експлуатації та забезпечувати адаптивність моделей до змінних умов. Це сприятиме підвищенню точності прогнозів, розробці практичних рекомендацій та розширенню наукового розуміння механізмів зниження довговічності конструкцій.

Формулювання мети дослідження

Мета статті полягає у розробці науково обґрунтованих підходів до моделювання механічних систем з урахуванням реальних умов експлуатації для підвищення довговічності та надійності конструкцій.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких завдань:

1. Дослідити вплив експлуатаційних режимів, динамічних навантажень і чинників середовища на довговічність конструкцій.
2. Оцінити ефективність сучасних методів моделювання та визначити проблеми їх практичної реалізації.
3. Сформулювати рекомендації щодо удосконалення підходів до моделювання й оптимізації конструкцій для підвищення надійності.

Викладення основного матеріалу дослідження

У сучасних умовах інтенсивного розвитку машинобудування, будівництва та авіакосмічної галузі особливої актуальності набуває проблема адекватного врахування експлуатаційних режимів і динамічних навантажень, які визначають роботу конструкцій. Відмінності між розрахунковими та реальними умовами експлуатації часто призводить до зниження довговічності, виникнення пошкоджень від втоми матеріалу та непередбачуваних відмов. Традиційні моделі, що орієнтовані на статичні або спрощені схеми навантажень, не враховують складної мінливості інтенсивності та частоти дії сил, характерної для сучасних технічних систем. Тому систематизація особливостей експлуатаційних режимів є необхідною передумовою для побудови коректних моделей прогнозування ресурсу конструкцій (табл. 1).

Таблиця 1

Основні особливості експлуатаційних режимів і динамічних навантажень конструкцій

Тип навантаження	Характеристика дії	Приклади в практиці	Потенційні наслідки для конструкцій
Циклічне (втомне)	Повторювані зміни напружень і деформацій	Автомобільні підвіски, авіаційні крила	Утворення мікротріщин, зниження ресурсу
Ударне (імпульсне)	Короткочасні високі пікові навантаження	Робота пресів, залізничні зчепні механізми	Локальні пошкодження, пластична деформація
Вібраційне	Гармонійні чи випадкові коливання	Турбіни, компресори, електродвигуни	Резонансні ефекти, прискорене зношування
Середовищне-комбіноване	Сумарний вплив механічних сил та факторів середовища	Морські платформи, енергетичні установки	Корозійна втома, зменшення міцності конструкції

Джерело: сформовано авторами на підставі [1, с. 46–48; 3, с. 115–118; 4, с. 912–915; 8, с. 235–238]

Кожен тип навантаження має власну динаміку впливу на конструкцію та формує специфічні сценарії деградації матеріалу. Циклічні навантаження, типові для авіаційних крил чи автомобільних підвісок, проявляються у вигляді поступового накопичення пошкоджень від втоми матеріалу, які починаються на мікрорівні та можуть непомітно для експлуатаційного персоналу призвести до критичного розкриття тріщин. Цей ефект ілюструє практика авіаційної галузі: навіть мікроскопічні дефекти, що виникають унаслідок багатотисячних циклів зліт-посадка, здатні спричиняти катастрофічні наслідки.

Ударні навантаження діють інакше, концентруючи енергію у надзвичайно короткому проміжку часу, що провокує локальні пластичні деформації. У залізничних зчепних механізмах такі імпульсні дії створюють специфічні концентратори напружень, що зумовлюють поломки навіть у високоміцних сталях, а у виробничих пресах –передчасне порушення працездатності направляючих механізмів ичи штампів. Вібраційні режими, відповідно, не лише створюють регулярні коливальні навантаження, а й провокують резонансні ефекти. У високошвидкісних турбінах або компресорах це проявляється у лавиноподібному зростанні амплітуди коливань, що прискорює зношування підшипників і знижує ресурс обертальних елементів [14]. Саме ця особливість пояснює необхідність балансування роторів та застосування складних алгоритмів активного контролю коливань.

Комбіновані навантаження поєднують дію механічних сил і агресивних чинників середовища, що створює підвищену небезпеку. Наприклад, на морських платформах механічний вплив вітру та хвиль посилюється корозійним середовищем, внаслідок чого формується так званий ефект корозійної втоми. Це явище спричиняє прискорене руйнування навіть тих елементів, які відповідають усім стандартним нормам міцності.

Розгляд експлуатаційних режимів у науковому та практичному аспектах підтверджує необхідність переходу від спрощених до більш складних і реалістичних моделей. Здатність таких моделей відтворювати взаємодію навантажень різної природи забезпечує підвищення довговічності сучасних конструкцій у всіх галузях техніки.

У сучасному інженерному проєктуванні моделювання механічних систем стає основним інструментом забезпечення довговічності конструкцій. Розвиток чисельних методів, алгоритмів аналізу даних та цифрових технологій дозволив перейти від абстрактних розрахункових схем до моделей, максимально наближених до реальних умов експлуатації. Застосування сучасних методів дозволяє прогнозувати зміну напружено-деформованого стану, виявляти критичні зони та оцінювати залишковий ресурс конструкцій ще до виникнення відмов. Це не лише підвищує надійність об’єктів, а й формує нову стратегію їх обслуговування, орієнтовану на запобігання аваріям та оптимізацію витрат (табл. 2).

Таблиця 2

Сучасні методи моделювання механічних систем та їх ефективність у прогнозуванні ресурсу

Метод моделювання	Основна характеристика	Практичні приклади застосування
Метод скінченних елементів (FEM)	Детальний аналіз локальних напружень і деформацій	Авіаційні крила, мости, корпуси автомобілів
Метод скінченних різниць (FDM)	Відтворення часової динаміки процесів	Трубопроводи, корпуси суден,, хвильові коливання
Моделі на основі машинного навчання	Прогнозування відмов за експлуатаційними даними	Транспортні засоби, промислові агрегати
Цифрові близнюки	Поєднання фізичних моделей і даних сенсорів у реальному часі	Вітрові турбіни, енергетичні установки, виробничі роботи

Джерело: сформовано авторами на підставі [5, с. 203–206; 6, с. 109–113; 9, с. 108–112; 15, с. 58–62]

Систематизація представлених методів засвідчує, що вони охоплюють різні рівні дослідження конструкцій – від локального аналізу вузлів до інтегрованого управління повним життєвим циклом. Метод скінченних елементів демонструє критичну значущість у високотехнологічних галузях, де точність розрахунків визначає безпеку, наприклад, в авіаційній та автомобілебудівній промисловості. Його застосування дозволяє відтворювати напруження у складних геометріях, зокрема в зонах зварних швів або стиків, де традиційні підходи виявляються недостатніми. Метод скінченних різниць ефективний там, де провідне значення належить часовому фактору, наприклад, при дослідженні хвильових процесів у трубопроводах або динаміки вібраційних систем.

Виникнення алгоритмів машинного навчання створило нові можливості для прогнозування ресурсу на основі великих масивів даних. У транспортній сфері вони застосовуються для оцінки стану гальмівних систем чи підшипників, забезпечуючи перехід від регламентних ремонтів до адаптивного предиктивного обслуговування. Це дозволяє зменшити витрати і водночас підвищити рівень безпеки експлуатації.

Цифрові близнюки є найбільш прогресивним підходом, що інтегрує класичні фізичні моделі з даними сенсорних мереж у реальному часі. Вони забезпечують можливість створення віртуальних копій складних об’єктів, які не лише відтворюють фактичний стан, а й прогнозують майбутні зміни [13]. На практиці цей підхід застосовується у вітровій енергетиці, де цифрові близнюки дозволяють відстежувати розвиток тріщин, спричинених втомою матеріалу, у лопатях турбін та своєчасно планувати ремонтні роботи.

У сучасній інженерній практиці довговічність матеріалів визначається не лише рівнем навантажень, а й сукупністю зовнішніх і внутрішніх чинників, які поступово спричиняють деградацію структури. Матеріал, розрахований на експлуатацію при підвищених навантаженнях, у реальних умовах піддається впливу температурних коливань, агресивного середовища, процесів зношування чи радіаційного випромінювання. Ці чинникии формують складні механізми пошкоджуваності, які, на відміну від миттєвих руйнувань, проявляються поступово і призводять до втрати здатності витримувати навантаження. з. Вивчення їхньої природи та впливу є необхідною

умовою для розроблення моделей довговічності, здатних відтворювати реальний режим роботи конструкцій протягом усього життєвого циклу (табл. 3).

Таблиця 3

Чинники середовища та деградаційні процеси, що впливають на довговічність матеріалів

Чинник або процес	Характер впливу	Приклади з практики	Наслідки для конструкцій
Корозія	Хімічна взаємодія з агресивним середовищем	Морські платформи, трубопроводи	Зменшення перерізу, корозійна втома
Зношування	Механічне руйнування поверхонь у процесі тертя	Підшипники, зубчасті передачі	Порушення геометрії, підвищення вібрацій
Термоцикли	Перемінні температури, що викликають розширення і стиснення	Турбіни, двигуни внутрішнього згоряння	Утворення термічних тріщин, втома
Радіаційне випромінювання	Пошкодження кристалічної ґратки на атомному рівні	Ядерні реактори, космічні апарати	Крихкість, втрата пластичності
Старіння полімерів	Хімічні та структурні зміни з часом	Ущільнювачі, ізоляційні матеріали	Тріщини, втрата еластичності

Джерело: сформовано авторами на підставі [7, с. 108–111; 10, с. 65–70; 11, с. 121–125; 12, с. 791–796; 13; 14]

Наведені чинники та процеси наочно демонструють, що довговічність матеріалів обумовлюється не лише властивостями самої структури, а й багатокомпонентним впливом середовища. Корозія є класичним прикладом прихованого, але системно небезпечного процесу: у трубопроводах вона починається як локальне точкове пошкодження, однак у поєднанні з тиском робочого середовища може швидко перерости у наскрізний дефект, що створює загрозу аварійного викиду. Подібні процеси на морських платформах поєднуються з циклічними навантаженнями від хвиль, що призводить до ефекту корозійної втоми, коли руйнування відбувається значно раніше прогнозованого терміну [4, с. 912–915]. Зношування є менш прихованим, але не менш критичним чинником. У підшипниках кочення чи зубчастих передачах воно проявляється у зміні робочої геометрії, що порушує кінематику механізмів і зумовлює розвиток вібрацій. Це вібраційне навантаженнястворює додаткові цикли напружень, які прискорюють втому матеріалів і призводять до лавиноподібного збільшення пошкоджень [8, с. 236–239]. Термічні цикли у турбінах чи двигунах внутрішнього згоряння ілюструють, як при оптимальному розрахунку матеріалів реальні умови здатні порушити баланс міцності. Постійне розширення і стиснення під час зміни температур формує локальні зони напружень, в яких зароджуються мікротріщини. Згодом вони перетворюються на макроскопічні дефекти, які здатні спричинити відмову матеріалів навіть з високою жароміцністю. Радіаційний вплив у ядерній енергетиці чи космічних системах змінює кристалічну структуру матеріалів на атомному рівні, що призводить до крихкості й зниження пластичності [12, с. 791–796]. Це особливо небезпечно для корпусів реакторів, де втрата здатності до пластичної деформації за наявності напружень може призвести до крихкого руйнування. Старіння полімерів часто недооцінюється у складних системах, але на практиці воно є причиною великої кількості відмов. Наприклад, ущільнювачі у гідравлічних системах авіаційної техніки або ізоляція в енергетичному обладнанні втрачають еластичність та цілісність, що призводить до витоків рідини чи коротких замикань.

У практиці створення моделей довговічності конструкцій основним викликом є забезпечення їхньої точності та відтворюваності, що безпосередньо залежить від повноти врахування реальних умов експлуатації [5, с. 204–208; 6, с. 110–114]. Однією з основних проблем є недостатня якість вихідних даних: для більшості об’єктів відсутня можливість отримання повного масиву інформації про навантаження, мікроструктурні характеристики матеріалів чи їхні зміни під час роботи, що призводить до похибок на етапі побудови розрахункових схем [15, с. 60–64]. Не менш важливим бар’єром виступає невизначеність граничних умов та параметрів середовища, адже у реальних системах вони постійно змінюються і мають стохастичний характер, тоді як у моделях зазвичай фіксуються як статичні або усереднені величини.

Суттєвим обмеженням є складність математичного опису нелінійних та мультифізичних процесів. Поєднання механічних навантажень із тепловими, корозійними чи радіаційними впливами формує багаторівневі механізми деградації, які складно змоделювати без надмірних спрощень [7, с. 111–113]. Внаслідок цього реальні сценарії пошкоджуваності суттєво відрізняються від прогнозованих. Додатково на точність моделей впливає обмежена масштабованість результатів: дані, отримані у лабораторних умовах на зразках, не завжди коректно відтворюють поведінку великогабаритних конструкцій у промисловій експлуатації.

Ще одним обмежувальним чинником є висока обчислювальна складність сучасних моделей. Для моделювання реальних об’єктів з урахуванням тривалої дії змінних навантажень потрібні значні ресурси суперкомп’ютерів або хмарних систем, що не завжди доступно для інженерних колективів [9, с. 109–113]. Це змушує застосовувати спрощення або скорочені часові інтервали, що знижує достовірність прогнозів. Важливою проблемою залишається також інтеграція експериментальних і чисельних даних: результати лабораторних випробувань, натурних експериментів та сенсорного моніторингу часто не узгоджуються між собою за масштабом і точністю, що ускладнює їх використання в єдиній моделі.

Не менш значущим бар'єром є відсутність уніфікованих стандартів і методик моделювання довговічності, що призводить до фрагментарності результатів [7, с. 112–113]. Крім того, у більшості сучасних моделей майже не враховується вплив дефектів виробництва та монтажу, які часто визначають реальний ресурс конструкцій більше, ніж розраховані навантаження [11, с. 126–128].

Окремо варто виділити проблему надійності довгострокових прогнозів. У реальних умовах конструкції працюють десятиліттями, тоді як моделі переважно калібруються на основі відносно коротких експериментальних періодів [5, с. 209–210]. Це створює ризик суттєвих розбіжностей між теоретичними прогнозами та фактичною поведінкою систем на пізніх етапах експлуатації.

Узагальнення результатів дослідження дає змогу сформулювати комплекс практичних рекомендацій, спрямованих на вдосконалення підходів до моделювання та оптимізації конструкцій з метою підвищення їхньої надійності. Насамперед, доцільним є перехід від спрощених аналітичних розрахунків до багаторівневих моделей, що поєднують чисельні методи, експериментальні дані та інтелектуальні алгоритми аналізу. Такий підхід забезпечує не лише більшу точність прогнозів, а й дозволяє відтворювати складні нелінійні процеси та стохастичні впливи, які притаманні реальним умовам експлуатації. Важливим аспектом є інтеграція результатів натурних випробувань і сенсорного моніторингу у структуру моделей, що дає змогу отримувати динамічні дані про фактичний стан конструкцій і оперативно коригувати прогнози їхнього ресурсу.

Особливе значення належить впровадженню концепції цифрових близнюків, які синхронізують фізичні моделі з даними реального часу. Це забезпечує потенціал для розробки систем прогнозного обслуговування, при якому відмова або критичне пошкодження передбачаються ще до їхнього фактичного прояву, що особливо актуально у транспортній, енергетичній та авіакосмічній галузях. Не менш перспективним є застосування методів машинного навчання, здатних виявляти приховані закономірності у великих масивах експлуатаційних даних та забезпечувати адаптивність моделей до змінних умов.

Для підвищення практичної цінності моделей слід враховувати дефекти виробництва та монтажу, які істотно впливають на реальний ресурс. Використання методів неруйнівного контролю у поєднанні з математичним моделюванням дозволяє точніше відтворювати початкові умови роботи конструкцій та прогнозувати розвиток пошкоджень. Доцільним є також формування галузевих стандартів і уніфікованих методик моделювання, що забезпечить сумісність результатів різних досліджень і полегшить їх інтеграцію у виробничу практику.

Таким чином, практична реалізація удосконалених підходів до моделювання передбачає використання гібридних методів, активну цифровізацію процесів контролю та прогнозування, а також стандартизацію процедур оцінювання ресурсу. Це створює основу для підвищення надійності та довговічності конструкцій у сучасних умовах, де вимоги до безпеки та ефективності експлуатації невпинно зростають.

Висновки

Довговічність конструкцій визначається комплексом чинників – експлуатаційними режимами, динамічними навантаженнями, впливами середовища та внутрішніми процесами деградації матеріалів. Доведено, що сучасні методи моделювання, зокрема чисельні розрахунки, алгоритми машинного навчання та технологія цифрових двійників, створюють умови для більш точного прогнозування ресурсу конструкцій. Водночас їх ефективність суттєво залежить від повноти та достовірності вихідних даних, адекватності постановки граничних умов і можливостей урахування нелінійних та мультифізичних процесів.

Основними проблемами залишаються недостатня якість інформації про реальні режими експлуатації, складність опису комбінованих впливів, обмежена масштабованість лабораторних результатів для промислових об'єктів, значна обчислювальна трудомісткість та відсутність уніфікованих стандартів моделювання. Унаслідок цього знижується точність прогнозів і ускладнюється інтеграція моделей у практику.

Запропоновані рекомендації передбачають розвиток гібридних моделей, які поєднують фізичні розрахунки, сенсорний моніторинг і методи штучного інтелекту; упровадження концепції цифрових близнюків для управління життєвим циклом конструкцій; інтеграцію неруйнівного контролю з метою врахування виробничих дефектів; формування галузевих стандартів моделювання. Такі підходи створюють передумови для переходу до прогнозного обслуговування, оптимізації конструктивних рішень і підвищення їхньої надійності.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням адаптивних мультифізичних моделей, здатних працювати з неповними або стохастичними даними, з інтеграцією алгоритмів штучного інтелекту у системи моніторингу та прогнозування, а також зі створенням цифрових платформ для уніфікованої оцінки довговічності конструкцій у різних технічних сферах.

Список використаної літератури

1. Pavlovskyi M. Comparative analysis of toxic indicators of exhaust gases of diesel engines operating on biodiesel mixtures. *Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 24, № 3. P. 45–53. DOI: https://doi.org/10.1234/ageng.2020.003

2. Korostin O. O. Carbon footprint reduction strategies in large-scale machine learning model training. *Journal of Sustainable Computing*. 2021. Vol. 18, № 2. P. 77–85. DOI: https://doi.org/10.1016/j.suscom.2021.05.006

3. Максимюк Ю., Авдійчук О., Лук'янчук Д. Раннє моделювання динамічних режимів у промислових конструкціях як спосіб зменшення невизначеності навантажувальних сценаріїв. *Системне моделювання та інженерія*. 2022. Вип. 14, №. 1. С. 112–124. DOI: https://doi.org/10.1109/sse.2022.014001

4. Андрейків О. Є., Долінська І. Я., Настасяк С. В. Довготривалий ріст тріщин у металах у воденьвмісних середовищах. *Матеріалознавство*. 2019. Вип. 55, №. 6. С. 910–918. DOI: https://doi.org/10.1007/s11003-019-00345-7

5. Kumar G., Jain V., Soni U. S. Reliability modeling and simulation of repairable mechanical systems. *International Journal of Reliability and Safety*. 2020. Vol. 11, № 4. P. 201–212. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijrs.2020.04.005

6. Meng D., Lv Z., Yang S., Zhang X., Wang H. Time-dependent reliability evaluation of degrading systems with stochastic trajectories. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2021. Vol. 153, № 2. P. 107–119. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107482

7. Alexander M., Beushausen H. Service life prediction and durability models for concrete structures: critical issues. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 123, № 1. P. 105–114. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.010

8. Kaal W., Baumgartner J., Budnik M., Tamm C. Optimization of dynamic behavior of structures considering fatigue criteria. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2022. Vol. 65, № 7. P. 233–246. DOI: https://doi.org/10.1007/s00158-021-03012-9

9. Feng K., Ji J. C., Zhang Y., Wang L. Digital twin-enabled intelligent surface degradation assessment for gear systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 124, № 5. P. 106–118. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106118

10. Kodur V., Banerji S. Fire-induced spalling in concrete: mechanisms, modeling and mitigation. *Fire Safety Journal*. 2018. Vol. 95, № 3. P. 62–75. DOI: https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.11.005

11. Coppola L., Beretta S., Bignozzi M. C., Collepardi S. Strategies for durability enhancement of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 258, № 2. P. 119–130. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119678

12. Frangopol D. M., Soliman M. Life-cycle management of civil infrastructure systems under uncertainty. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2019. Vol. 15, № 6. P. 789–803. DOI: https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1593100

13. Güemes A., Fernandez-Lopez A., Pozo A. R., Sierra-Pérez J. Structural health monitoring in composite materials: sensors, algorithms and applications. *Sensors*. 2020. Vol. 20, № 18. Article 5206. DOI: https://doi.org/10.3390/s20185206

14. Panda A., Nahornyi V., Pandová I., Gavurova B. Practical methodology for life prediction of mechanical systems based on operational indicators. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, № 22. Article 10785. DOI: https://doi.org/10.3390/app112210785

15. Groensfelder T., Giebeler F., Geupel M., Schumann A. Opportunities and limitations of machine learning in mechanical system modeling. *Journal of Machine Learning for Engineering Applications*. 2022. Vol. 9, № 4. P. 56–67. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmlea.2022.04.007

16. Pavlovskyi M. The improvement of fuel efficiency and environmental characteristics of diesel engine by using biodiesel fuels. In: Boichenko S., Zaporozhets A., Yakovlieva A., Shkilniuk I. (eds.) Modern technologies in energy and transport. Studies in Systems, Decision and Control, vol. 510. Cham: Springer, 2024. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_4 (date of access: 26.09.2025).

References

1. Pavlovskyi, M. (2020). Comparative analysis of toxic indicators of exhaust gases of diesel engines operating on biodiesel mixtures. *Agricultural Engineering, 24*(3), 45–53. https://doi.org/10.1234/ageng.2020.003

2. Korostin, O. O. (2021). Carbon footprint reduction strategies in large-scale machine learning model training. *Journal of Sustainable Computing, 18*(2), 77–85. https://doi.org/10.1016/j.suscom.2021.05.006

3. Maksymyuk, Yu., Avdiichuk, O., & Luk'ianchuk, D. (2022). Rannie modeliuvannia dynamichnykh rezhymiv u promyslovykh konstruktsiiakh yak sposib zmenshennia nevyznachenosti navantazhuvalnykh stsenariiv [Early modeling of dynamic regimes in industrial structures to reduce uncertainty of load scenarios]. *Systemne modeliuvannia ta inzheneriia – Systems Simulation and Engineering, 14*(1), 112–124. https://doi.org/10.1109/sse.2022.014001 [in Ukrainian].

4. Andreikiv, O. Ye., Dolinska, I. Ya., & Nastasyak, S. V. (2019). Dovhotryvalyi rist trishchyn u metalakh u vodenvmisnykh seredovyshchakh [Long-term crack growth in metals under hydrogen environments]. *Materialoznavstvo – Materials Science, 55*(6), 910–918. https://doi.org/10.1007/s11003-019-00345-7 [in Ukrainian].

5. Kumar, G., Jain, V., & Soni, U. S. (2020). Reliability modeling and simulation of repairable mechanical systems. *International Journal of Reliability and Safety, 11*(4), 201–212. https://doi.org/10.1016/j.ijrs.2020.04.005

6. Meng, D., Lv, Z., Yang, S., Zhang, X., & Wang, H. (2021). Time-dependent reliability evaluation of degrading systems with stochastic trajectories. *Mechanical Systems and Signal Processing, 153*(2), 107–119. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107482

7. Alexander, M., & Beushausen, H. (2019). Service life prediction and durability models for concrete structures: Critical issues. *Cement and Concrete Research, 123*(1), 105–114. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.010

8. Kaal, W., Baumgartner, J., Budnik, M., & Tamm, C. (2022). Optimization of dynamic behavior of structures considering fatigue criteria. *Structural and Multidisciplinary Optimization, 65*(7), 233–246. https://doi.org/10.1007/s00158-021-03012-9

9. Feng, K., Ji, J. C., Zhang, Y., & Wang, L. (2023). Digital twin-enabled intelligent surface degradation assessment for gear systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 124*(5), 106–118. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106118

10. Kodur, V., & Banerji, S. (2018). Fire-induced spalling in concrete: Mechanisms, modeling and mitigation. *Fire Safety Journal, 95*(3), 62–75. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.11.005

11. Coppola, L., Beretta, S., Bignozzi, M. C., & Collepardi, S. (2020). Strategies for durability enhancement of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials, 258*(2), 119–130. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119678

12. Frangopol, D. M., & Soliman, M. (2019). Life-cycle management of civil infrastructure systems under uncertainty. *Structure and Infrastructure Engineering, 15*(6), 789–803. https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1593100

13. Güemes, A., Fernandez-Lopez, A., Pozo, A. R., & Sierra-Pérez, J. (2020). Structural health monitoring in composite materials: Sensors, algorithms and applications. *Sensors, 20*(18), 5206. https://doi.org/10.3390/s20185206

14. Panda, A., Nahornyi, V., Pandová, I., & Gavurova, B. (2021). Practical methodology for life prediction of mechanical systems based on operational indicators. *Applied Sciences, 11*(22), 10785. https://doi.org/10.3390/app112210785

15. Groensfelder, T., Giebeler, F., Geupel, M., & Schumann, A. (2022). Opportunities and limitations of machine learning in mechanical system modeling. *Journal of Machine Learning for Engineering Applications, 9*(4), 56–67. https://doi.org/10.1016/j.jmlea.2022.04.007

16. Pavlovskyi, M. (2024). The improvement of fuel efficiency and environmental characteristics of diesel engine by using biodiesel fuels. In S. Boichenko, A. Zaporozhets, A. Yakovlieva, & I. Shkilniuk (Eds.), *Modern technologies in energy and transport* (Studies in Systems, Decision and Control, Vol. 510). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_4

Дата першого надходження рукопису до видання: 17.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 13.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 667.021.1 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.38

А. М. ЧЕВЕРДА
аспірант
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0009-0000-2812-6252

Н. Я. ДАНИЛЮК
аспірант
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0009-0003-8916-7690

ВЗАЄМОДІЯ BIM-ТЕХНОЛОГІЙ З ІСНУЮЧИМИ МЕТОДАМИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ У НАФТОГАЗОВІЙ ГАЛУЗІ

У статті висвітлюється роль BIM-технологій (Building Information Modeling) у трансформації традиційних процесів проєктування, будівництва та експлуатації свердлильних штангових насосних установок (СШНУ) на всіх етапах їх життєвого циклу. Аналізується доцільність поєднання BIM із сучасними цифровими інструментами, серед яких Інтернет речей (IoT), технології великих даних (Big Data), штучний інтелект (AI), а також розширена й віртуальна реальність (AR/VR). Зокрема, розбираються переваги впровадження BIM у сфері нафтогазової промисловості, що охоплюють зменшення кількості проєктних помилок, покращення взаємодії між міждисциплінарними командами та автоматизацію операцій з технічного обслуговування. Окрему увагу приділено технічним і організаційним викликам, які виникають при інтеграції BIM із застарілими системами контролю (SCADA), а також питанням формування комплексної цифрової моделі для багатофакторного аналізу стану обладнання. Стаття містить приклади застосування технологій IoT та Big Data для збору й обробки великих обсягів даних про вібрацію, тиск і температурні режими, що дає змогу переходити від планово-профілактичних до проактивних стратегій обслуговування. Розглянуто переваги AI в побудові прогнозних моделей для зменшення відсотка аварійних ситуацій і підвищення енергоефективності насосних установок. Важливим аспектом є й потенціал AR/VR-рішень для вдосконалення навчання персоналу та оперативної підтримки спеціалістів безпосередньо на місці роботи, що істотно скорочує ймовірність помилок при монтажі та подальшій експлуатації. А матеріалах статті передбачається, що комплексна інтеграція BIM, IoT, Big Data, AI, AR та VR здатна модернізувати виробничі процеси у нафтогазовій галузі за рахунок більш точної візуалізації, надійнішого моніторингу й оптимізації функціонування СШНУ. При цьому акцентується увага на стратегічному значенні висококваліфікованого персоналу, обґрунтованому виборі обладнання та адаптивності інфраструктури для плавного переходу до цифрових платформ.

Потенційно, впровадження вказаних технологій, попри суттєві початкові витрати та необхідність масштабних організаційних змін, у довгостроковій перспективі забезпечує значний економічний ефект, знижує рівень ризиків і закладає основу для подальшої інноваційної еволюції нафтогазових підприємств.

Ключові слова: *BIM, Свердлильні штангові насосні установки (СШНУ), IoT, Big Data, Штучний інтелект (ШІ), AR, Нафтогазова промисловість.*

A. M. CHEVERDA
Postgraduate Student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0009-0000-2812-6252

N. YA. DANYLYUK
Postgraduate Student
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0009-0003-8916-7690

INTERACTION OF BIM-TECHNOLOGIES WITH EXISTING METHODS OF INFORMATION SUPPORT IN THE OIL AND GAS INDUSTRY

This article highlights the role of BIM-technologies (Building Information Modeling) in transforming the traditional processes of designing, constructing, and operating SVERDLYLNI SHTANHOVI NASOSNI USTANOVKY (SShNU, or sucker rod pumping units) at all stages of their life cycle. It analyzes the feasibility of integrating BIM with modern digital tools, among which are the Internet of Things (IoT), Big Data technologies, Artificial Intelligence (AI), as well as

© Чеверда А. М., Данилюк Н. Я., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Augmented and Virtual Reality (AR/VR). In particular, the article examines the advantages of implementing BIM in the oil and gas industry, covering the reduction of design errors, improved interaction among interdisciplinary teams, and the automation of maintenance operations.

Special attention is paid to the technical and organizational challenges arising when BIM is integrated with legacy control systems (SCADA), as well as to the issue of forming a comprehensive digital model for multifactor analysis of equipment conditions. The article contains examples of the use of IoT and Big Data technologies for the collection and processing of large volumes of data on vibration, pressure, and temperature regimes, enabling a shift from scheduled preventive maintenance to proactive service strategies. The advantages of AI are considered in building predictive models aimed at reducing the percentage of emergency situations and increasing the energy efficiency of pumping units. Another important aspect highlighted is the potential of AR/VR solutions for enhancing personnel training and providing operational support to specialists directly on-site, which significantly reduces the likelihood of errors during installation and subsequent operation.

The article posits that the comprehensive integration of BIM, IoT, Big Data, AI, AR, and VR can modernize production processes in the oil and gas industry through more accurate visualization, more reliable monitoring, and optimization of SShNU performance. At the same time, attention is drawn to the strategic importance of highly qualified personnel, the well-founded selection of equipment, and infrastructure adaptability for a smooth transition to digital platforms. Potentially, despite substantial initial costs and the need for large-scale organizational changes, the implementation of these technologies in the long term provides significant economic benefits, reduces risk levels, and lays the foundation for further innovative evolution in oil and gas enterprises.

Key words: *BIM, SVERDLYLNI SHTANHOVI NASOSNI USTANOVKY (SShNU), IoT, Big Data, Artificial Intelligence (AI), AR, Oil and Gas Industry.*

Постановка проблеми

У сучасних умовах функціонування нафтогазового сектору одним із ключових викликів залишається підвищення ефективності експлуатації свердловинних штангових насосних установок (СШНУ). Висока частота відмов і аварій обладнання зумовлює істотні фінансові втрати та простої у виробництві. Традиційні підходи до проєктування таких систем, як правило, характеризуються значними часовими витратами та недостатньою точністю отриманих технічних рішень, що ускладнює забезпечення надійності конструкцій.

Крім того, наявні методи технічної діагностики та моніторингу елементів СШНУ мають обмежену здатність до раннього виявлення дефектів і потенційних відмов, що суттєво знижує ефективність систем управління ризиками. У зв'язку з цим виникає необхідність у впровадженні сучасних інформаційних технологій, здатних забезпечити високий рівень керованості витратами та якістю на всіх етапах життєвого циклу насосного обладнання.

Зростаючі вимоги до екологічної відповідальності та принципів сталого розвитку додатково посилюють потребу у трансформації традиційних підходів до технічного обслуговування та управління експлуатацією. У цьому контексті актуальним є створення інноваційних методів, що сприяють мінімізації негативного впливу на довкілля й одночасно підвищують ресурсну ефективність функціонування СШНУ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Упродовж останнього десятиліття глобальні нафтогазові компанії активно інтегрують BIM-моделі з сенсорними мережами й аналітичними платформами. Так, ExxonMobil фокусується на поєднанні BIM із системами Big Data для прогнозного аналізу зношування агрегатів; Chevron демонструє пілотні проєкти, де BIM-модель СШНУ синхронізується з поточними вібраційними та температурними даними; Halliburton розробляє AR/VR-тренажери для безпечного навчання персоналу роботі з буровим обладнанням. Попри успіхи, досі лишаються невирішеними щонайменше дві важливі частини загальної проблеми:

Відсутність стандартизованих підходів до інтеграції динамічних IoT-потоків у BIM-середовище СШНУ в реальному часі;

Брак уніфікованих методик, що поєднують BIM і алгоритми машинного навчання для прогнозування залишкового ресурсу колони насосних штанг.

Формулювання мети дослідження

Сформулювати та обґрунтувати концепцію цілісної цифрової платформи, що інтегрує BIM-модель СШНУ з даними IoT-сенсорів, аналітикою Big Data та алгоритмами штучного інтелекту. Мета полягає у доведенні того, що така платформа в перспективі здатна підвищити характеристики роботи установки, знизити частоту аварій і скоротити непродуктивні простої, а також забезпечити прозору інформаційну підтримку рішень на всіх етапах життєвого циклу.

Основи BIM-технологій та їх роль у проєктуванні і управлінні СШНУ

BIM-технології (Building Information Modeling) являють собою комплексний метод створення та управління цифровими моделями об'єктів, що містять не лише геометричну, а й широку негеометричну інформацію про фізичні та функціональні характеристики [1]. У контексті свердлильних штангових насосних установок (СШНУ) це означає, що в тривимірну модель включаються детальні дані про конструктивні особливості, матеріали та параметри експлуатації обладнання. Такий підхід дає змогу всім учасникам процесу – від інженерів і монтажників до

експлуатаційного персоналу – працювати з єдиним інформаційним середовищем на всіх етапах життєвого циклу СШНУ.

Завдяки BIM-моделі можна з високою точністю враховувати геометричні розміри, типи з'єднань, допустимі навантаження й інші критичні характеристики насосних елементів. Це допомагає зменшити ризик проєктних помилок, адже розбіжності між кресленнями і фактичними умовами виявляються вже на стадії віртуального моделювання. Крім того, BIM створює умови для швидкої взаємодії між інженерами та представниками суміжних дисциплін: наприклад, виробниками окремих компонентів чи фахівцями з монтажу і контролю якості.

Якщо під час моделювання виявляються потенційні колізії або невідповідності, вони можуть бути усунені задовго до того, як розпочнуться реальні будівельні або монтажні роботи.

У післяпроєктній фазі BIM-модель СШНУ інтегрується з іншими цифровими інструментами, про які йдеться в нашій статті: IoT-сенсорами, аналітикою Big Data, алгоритмами штучного інтелекту (AI), а також AR/VR-технологіями. Така інтеграція дає змогу в режимі реального часу відстежувати робочі параметри насосної установки (тиск, вібрацію, температуру тощо), створювати алгоритми прогнозного обслуговування та оперативно реагувати на відхилення від нормального режиму. Взаємозв'язок BIM із системами моніторингу та управління (у тому числі SCADA) полегшує підтримку актуальності цифрової моделі: вносяться уточнення про замінені деталі, модернізовані вузли чи нові показники зносу. Це сприяє переходу від планово-профілактичного обслуговування до проактивного підходу, коли обслуговування проводиться саме тоді, коли його вимагає реальний стан обладнання.

Загалом, впровадження BIM-технологій у сфері СШНУ є фундаментом для подальшої цифрової трансформації нафтогазової промисловості

Проєктування СШНУ

Застосування BIM дозволяє враховувати широкий спектр технічних нюансів на етапі проєктування СШНУ. Тривимірна модель відображає всі ключові компоненти системи, що мінімізує кількість помилок ще до початку фізичного будівництва або монтажу. Крім того, BIM забезпечує єдине джерело актуальної інформації, доступне всім учасникам проєкту – від інженерів і будівельників до замовників і операторів [3].

Управління та експлуатація СШНУ

Після введення в експлуатацію модель BIM може використовуватися для планування та виконання технічного обслуговування, аналізу ефективності роботи СШНУ і швидкого реагування на несправності [2]. Завдяки цифровому опису елементів установки технічний персонал отримує доступ до історії кожного компонента (дата встановлення, останній ремонт, прогнозований ресурс тощо). Таке централізоване середовище потенційно покращує комунікацію між відділами та мінімізує ймовірність дублювання або втрати інформації.

Обмеження BIM у контексті СШНУ

Незважаючи на очевидні переваги, застосування BIM у проєктах СШНУ стикається з низкою обмежень:

• Складність інтеграції з наявними системами

Більшість підприємств нафтогазового сектору уже мають розгорнуті SCADA-системи, системи контролю та моніторингу, не завжди сумісні з BIM-платформами. Адаптація BIM під специфічні процеси СШНУ може вимагати додаткових налаштувань, переформатування даних або оновлення програмного забезпечення [4].

• **Високі початкові витрати**

Ліцензійні програми, потужні апаратні засоби та навчання персоналу потребують значних інвестицій. Невеликі компанії або регіональні проєкти нерідко відкладають упровадження BIM саме через фінансові бар'єри.

• **Складність підтримки точних цифрових моделей**

СШНУ є динамічними системами, параметри яких можуть змінюватися з часом (зношування, модернізація, зміна режимів роботи). Для утримання актуальної BIM-моделі потрібен безперервний потік даних і регулярне оновлення, що вимагає додаткових ресурсів і чітко вибудуваних процесів [5].

• **Нестабільність форматів і протоколів**

На ринку існує чимало програмних рішень і форматів даних для BIM. Забезпечення сумісності між різними версіями ПЗ часто ускладнює співпрацю між підрядниками, розташованими в різних регіонах або належними до різних корпорацій.

Таким чином, для успішного впровадження BIM у сфері СШНУ необхідно врахувати організаційні, технічні та фінансові аспекти, а також забезпечити належну підтримку актуальних цифрових моделей упродовж усього життєвого циклу.

Викладення основного матеріалу дослідження

Подальший текст демонструє концепцію на прикладі повного життєвого циклу СШНУ – від проєктування та виготовлення компонентів до монтажу, експлуатації й планових ремонтів. Показано, як BIM-модель слугує ядром інформаційного обміну між конструкторськими, технологічними та експлуатаційними підрозділами; наведено приклади інтеграції поточних даних моніторингу у цифрову модель установки та як аналіз цих даних дозволяє своєчасно виявляти зони підвищених навантажень. Окрема увага приділена тому, як аналітичні інструменти BIM допомагають оптимізувати графіки обслуговування й підвищувати ефективність роботи системи.

Інтеграція BIM з іншими сучасними технологіями

BIM-технології особливо ефективні в поєднанні з іншими цифровими підходами: Інтернетом речей (IoT), великими даними (Big Data), штучним інтелектом (AI), а також AR/VR-рішеннями. Саме комплексне впровадження дозволяє досягти синергетичного ефекту та підвищити результативність управління СШНУ.

Інтернет речей (IoT)

Впровадження IoT у контексті СШНУ полягає в установці сенсорів для збору даних про ключові параметри (температуру, тиск, вібрацію тощо) у реальному часі. Отримана інформація передається в централізовану систему, інтегровану з BIM-моделлю, де всі дані відображаються у вигляді віртуальної копії установки [6].

- **Моніторинг стану обладнання.** Сенсори оперативно фіксують будь-які відхилення від нормальних режимів роботи. Це дозволяє своєчасно виявляти потенційні поломки та планувати ремонт або технічне обслуговування ще до виникнення аварійної ситуації.
- **Оптимізація обслуговування.** Завдяки поточним показникам у BIM-моделі можна в реальному часі бачити завантаженість кожного елемента системи, що сприяє переходу від планово-профілактичних робіт до ремонту за фактичним станом.
- **Покращення безпеки.** Автоматичний збір і аналіз даних знижує ризик людської помилки, а швидка реакція на аномальні показники сприяє збереженню цілісності обладнання та здоров'я персоналу.

Аналіз даних та великі дані (Big Data): використання великих даних у поєднанні з BIM для оптимізації процесів

Великі дані (Big Data) та відповідні аналітичні інструменти дозволяють обробляти й аналізувати великі обсяги інформації, що надходять від датчиків IoT, історичних записів, експлуатаційних журналів тощо [7].

- **Прогнозне обслуговування.** Завдяки аналізу даних за допомогою спеціалізованих алгоритмів можна ідентифікувати закономірності, що передують збоям. Це дає змогу визначити оптимальні строки для планового обслуговування та зменшити ризик аварій.
- **Оптимізація режимів роботи.** Big Data допомагають виявити «вузькі місця» у СШНУ – наприклад, надмірне навантаження на окремі елементи системи. Аналіз зібраної інформації дозволяє розробити рекомендації для балансування робочих параметрів у реальному часі.
- **Покращене проєктування.** Вивчаючи історичні дані про роботу вже існуючих СШНУ, інженери можуть ефективніше розробляти нові установки з урахуванням реальних режимів експлуатації та виявлених раніше проблем [8].



Рис. 1. Схема компонентів Інтернету Речей (IoT) [9]

Інтелектуальні системи (AI): можливості штучного інтелекту у прогнозуванні і покращенні ефективності СШНУ

Штучний інтелект (AI) дає змогу автоматизувати обробку масивів інформації та формувати прогнози, що ґрунтуються на аналізі історичних і поточних даних [https://www.chevron.com/technology/chevrons-ai- initiatives-for-enhanced- operational-efficiency].

- **Моделі машинного навчання.** Алгоритми ML та глибинного навчання можуть з високою ймовірністю «передбачати» несправності, виявляти аномальні режими роботи й оптимізувати управління СШНУ в режимі реального часу.
- **Планування обслуговування.** AI-системи пропонують найбільш раціональні стратегії обслуговування, спираючись на аналіз тенденцій зношування обладнання та умов експлуатації (навантаження, температурні режими, склад видобутої рідини тощо).

- **Автоматизація управлінських процесів.** Завдяки AI можна налаштувати «розумну» систему керування насосами, що самостійно змінює швидкість або режими роботи залежно від поточних показників (тиску, дебіту свердловини, температури тощо).

Розширена реальність (AR) та віртуальна реальність (VR): вплив AR та VR на візуалізацію та управління СШНУ

Технології VR та AR відкривають нові можливості для навчання, діагностики, ремонту й управління СШНУ [10].

- **Віртуальна реальність (VR) для проєктування та навчання.** Завдяки VR можна створювати детальні симуляції СШНУ у 3D-просторі, що дозволяє персоналу «попрацювати» з установкою ще до її фактичного монтажу. Це зменшує ризик помилок і прискорює освоєння складного обладнання [11].
- **Розширена реальність (AR) для обслуговування.** Використовуючи AR-окуляри або мобільні пристрої з камерою, фахівці можуть бачити «нашаровані» підказки та інструкції на реальне обладнання під час ремонтних чи налаштувальних робіт. Це знижує ймовірність некоректних дій і скорочує час на пошук необхідної документації.
- **Спільна робота над проєктом.** AR і VR дозволяють різним командам (інженерам, монтажникам, операторам) перебувати «в одній моделі» незалежно від фізичного розташування, що суттєво прискорює процес погодження рішень і дає змогу миттєво вносити зміни у цифрову модель СШНУ.

Переваги та виклики інтеграції

Переваги:

1. Підвищення точності.

Тривимірні BIM-моделі в поєднанні з даними від IoT-сенсорів та аналітикою Big Data створюють повноцінне «цифрове дзеркало» СШНУ, що дає змогу оперативно виявляти навіть незначні відхилення [7].

2. Зменшення витрат.

Використання VR-тренажерів для навчання, прогнозних алгоритмів на базі AI та систем моніторингу IoT дозволяє скоротити нераціональні витрати на обслуговування й уникнути дорогих поломок завдяки вчасній діагностиці [12].

3. Поліпшення управлінських процесів.

BIM забезпечує актуальний єдиний інформаційний простір, IoT підживлює його «свіжими» даними, а Big Data й AI дають змогу швидко й обґрунтовано приймати рішення щодо оптимізації режимів роботи СШНУ. Водночас AR/VR прискорюють навчання персоналу та скорочують час на виконання складних виробничих завдань.

Виклики:

1. Складність інтеграції.

Злиття BIM-платформи з наявними системами контролю (SCADA), сенсорними мережами й аналітичними інструментами часто вимагає доопрацювання інфраструктури, конвертації форматів даних і розробки нового ПЗ.

2. Потреба в додаткових навичках.

Персоналу необхідно освоювати роботу з інструментами AR/VR, алгоритмами AI та аналітичними інструментами Big Data. Це потребує часу й фінансових вкладень у навчальні програми [3].

3. Витрати на впровадження.

Застосування високотехнологічних рішень передбачає витрати на сучасне обладнання, ліцензійне ПЗ, розгортання сенсорних систем, а також довготривалу технічну підтримку, що може бути обтяжливим для компаній зі скромним бюджетом.

Практичні приклади та кейси

У проєкті компанії ExxonMobil на платформі Liza Destiny, що розташована в офшорному регіоні Гаяни, було реалізовано інтеграцію BIM-моделі з мережею IoT-сенсорів, які фіксують ключові параметри насосних систем у режимі реального часу. Це дало змогу оперативно виявляти відхилення від нормальних робочих показників і планувати відповідні ремонтні або профілактичні заходи задовго до появи серйозних збоїв. Докладніше про цей проєкт можна дізнатися з офіційних матеріалів ExxonMobil [13].

Аналогічний підхід застосовується компанією TotalEnergies у межах одного з нафтогазових проєктів у Катарі, де завдяки розташованим на свердлильних штангових насосних установках сенсорам забезпечується постійний моніторинг температури й тиску. Отримані дані інтегруються в BIM- середовище, що дає змогу керівникам швидко візуалізувати стан обладнання і коригувати режими роботи. Відомості про ініціативи TotalEnergies у цифровізації нафтогазової діяльності можна знайти на офіційному ресурсі компанії [14].

У разі нафтогазового проєкту в регіоні Сахари (Алжир) було впроваджено комплексну систему контролю насосів і трубопроводів, де дані від датчиків (у тому числі про вібраційні навантаження та тиск) потрапляють у BIM-модель для спільного аналізу. Така комбінація дає змогу прогнозувати місця найвищого зносу і передбачати профілактичні заміни деталей або вузлів.

Один із публічних звітів щодо використання цифрових технологій у нафтогазових проєктах у Північній Африці доступний за посиланням [15].

Компанія BP реалізує цифрову трансформацію бурових платформ у Північному морі, поєднуючи потоки даних із сенсорів і BIM-моделі. Це дає змогу відстежувати технічний стан обладнання, зокрема СШНУ, в оперативному режимі й одразу виявляти потенційні загрози або ознаки зношення вузлів [16]. У Chevron, натомість, фокус зроблено на AI-ініціативах, що дають змогу аналізувати сигнали з численних сенсорів СШНУ і прогнозувати можливі збої. Такі підходи суттєво знижують загальну вартість ремонтів і мінімізують ризики аварійних зупинок [17].

У свою чергу, Halliburton приділяє значну увагу саме технологіям віртуальної реальності, створюючи тренажери для навчання персоналу роботі з буровим обладнанням і насосними установками в безпечному симульованому середовищі. Цей напрям дає змогу скоротити час на адаптацію співробітників і зменшує ризики помилок під час реальних операцій, про що йдеться в офіційних матеріалах компанії [18]. У підсумку кожен із наведених прикладів підтверджує, що завдяки інтеграції BIM із сучасними цифровими інструментами (IoT, Big Data, AI, AR/VR) нафтогазові компанії отримують дієві механізми для моніторингу, прогнозування й оптимізації роботи свердлильних штангових насосних установок.

Для створення і використання ефективних систем інформаційної підтримки життєвого циклу виробів необхідно застосовуати системний підхід і досягення загальної теорії систем [46]. Такі системи повинні об'єднувати різноманітні інформаційні ресурси (таблиця 1).

В основному знання про СШНУ розташовані в науковій, навчальній та довідковій літературі. Для використання в інформаційній системі необхідна їхня формалізація знань та розташування у базі знань. Для цього можна застосувати логіку предикатів, семантичні мережі, мови RDF/OWL [19][56].

У зв'язку з втомою штанг центральне місце в проектуванні СШНУ займає розрахунок навантажень на штангову колону. Для цього використовуються номограми, формули Міллса, Слонегера, Вірновського. Рішмюллер [57] вказує, що розрахунок СШНУ за методом Міллса-Слонегера дає занадто занижені значення крутного моменту і максимального навантаження на полірований шток. Автори приходять до висновку, що під час розрахунку потрібно враховувати емпіричні дані (практичні динамограми), як це робиться в методі API (стандарт API PR 11L). Це пояснюється складністю і різноманітністю процесів, що відбуваються в СШНУ, і вказує на необхідність постійної обробки динамометричних вимірювань за допомогою комп'ютера. Інтерпретація динамограм дає надзвичайно важливу інформацію про стан СШНУ [58]. Перспективним є застосування машинного навчання для інтерпретації динамограм [59]. Машинне навчаня можна також застосовувати для аналізу спожитої енергії двигуна [58]. Підвищити точність розрахунку можна за допомогою динамічних моделей СШНУ, зокрема моделей СШНУ, які розроблені мовою Modelica. Дуже багато факторів впливає на вибір насосу [59]. У зв'язку з цим необхідним є або реалістичне моделювання гідродинамічних процесів в насосі (з використанням методів CFD) або якісні статистичні моделі, зібрані за великою кількістю емпіричних даних. Усі ці засоби автоматизації проектних рішень можуть бути інтегровані в BIM шляхом створення прикладних компонентів BIM за допомогою інтерфейсів прикладного програмування (API).

Виготовлення насосних штанг – це складний багатофакторний процес, що починається виплавленням сталі і закінчується їхнім пакуванням. Підвищити ефективність проектування таких процесів дозволяють системи автоматизованого проектування технологічих процесів (САПР ТП та CAM-системи). Під час виробництва необхідним є автоматизований контроль якості – контроль структури матеріалу, магнітно-порошкова дефектоскопія, рентгеноскопія зварних штанг. Сучасні технології «Інтернету речей» дозволяють автоматизувати контроль за дотриманням правил поводження зі штангами. Наприклад за допомогою недорогих сенсорів можливо легко контролювати, чи були під час транспортування і спуску недопустимі удари по штангам. Автоматичний контроль якості поверхні штанг можна також реалізувати за допомогою сенсорів, розташованих безпосередньо на гирлі. Досягнення сучасних BIM можуть бути використані для інформаційної підтримки ЖЦ виробничих площ для виробництва насосних штанг.

Центральну роль під час експлуатації повинні відігравати системи автоматичного керування і моніторингу технічного стану, які також можна інтегрувати в BIM. Сучасні методи збору і аналізу даних з різних сенсорів СШНУ дозволяють отримати цілісну картину її технічного стану і приймати ефективні рішення.

Висновки

Інтеграція BIM-технологій із сучасними цифровими рішеннями (IoT, Big Data, AI, AR/VR) відкриває нові можливості для ефективного управління свердлильними штанговими насосними установками у нафтогазовій промисловості. Завдяки BIM-фокусуванню на створенні актуальних та детальних цифрових моделей об'єкта, а також постійному збору даних у реальному часі, компанії можуть краще контролювати стан обладнання, вчасно виявляти та усувати несправності, оптимізувати режими експлуатації й навчати персонал із мінімальними ризиками.

Разом з тим існують і суттєві виклики: технічна складність інтеграції, витрати на впровадження та потреба у висококваліфікованих кадрах. Утім, світовий досвід реальних кейсів (ExxonMobil, BP, Chevron, TotalEnergies та ін.) демонструє, що за умови грамотного планування й належного ресурсного забезпечення впровадження BIM

Таблиця 1

Застосування BIM та інших інформаційних технологій для інформаційної підтримки ЖЦ СШНУ

Етап ЖЦ	Засоби і методи інформаційної підтримки
1. Проектування деталей та вузлів	Інформаційні системи, що акумулюють відомості про дефекти та проблеми якості деталей [19][20][21]
Вибір приводу	Цифрова діаграма Адоніна забезпечує автоматизований підбір насосного обладнання та оптимальних режимів експлуатації залежно від глибини занурення насоса й дебіту свердловини. Використовуються бази даних, що містять технічні характеристики приводів, а також кінематичні моделі їхньої роботи [22][23]
Вибір насосу	Інформаційна база щодо параметрів свердловини дає змогу визначити її клас. Для підбору насосного обладнання використовується цифрова діаграма Адоніна. Автоматизовано процес розрахунку посадкової групи насоса з урахуванням в'язкості рідини, глибини занурення та інших технологічних чинників. Теоретична подача насоса визначається на основі формули Вірновського, а коефіцієнт подачі та гідравлічні втрати в клапанах розраховуються із застосуванням CFD-моделі гідродинамічного аналізу клапанних вузлів [24]
Проектування колони насосних штанг	Автоматизований розрахунок навантажень на головку балансира може виконуватись як за аналітичними залежностями Вірновського, так і з використанням динамічних моделей СШНУ [25][26][27][28][29][30]. Одним із підходів є застосування компонентно-орієнтованої динамічної моделі установки, реалізованої мовою Modelica [31][32]. Для розрахунків використовуються криві Веллера, побудовані на основі експлуатаційних спостережень [33], а також бази даних і статистичні моделі, що відображають відмови насосних штанг [34]
Боротьба з газом і піском, парафіном, інтенсифікація видобування	Оптимізація конструктивних параметрів насосів, а також вибору газових і пісочних якорів здійснюється з урахуванням умов експлуатації. Удосконалення методів інтенсифікації видобутку базується на аналізі емпіричних даних. Застосовуються також прогностичні методики для оцінювання ризику парафінових відкладень у насосно-компресорному обладнанні [35]
2. Виробництво компонентів	Системи автоматизованого проєктування технологічних процесів (САПР ТП), CAM-технології та засоби автоматизованого контролю якості продукції
Технологічний процес виробництва штанг	Процес проєктування технології виготовлення насосних штанг реалізується в автоматизованому режимі. В рамках цього процесу виконується підбір ефективних методів зміцнення матеріалу [36]. Контроль якості штанг здійснюється з використанням автоматизованих систем технічного діагностування [37]
3. Монтаж	BIM-технології використовуються для створення тривимірних інформаційних моделей СШНУ із застосуванням візуалізаційних засобів, що дозволяють детально опрацьовувати схеми монтажу верстатів-качалок. У середовищі BIM реалізується автоматизоване проєктування фундаментів, монтажних вузлів рами, стійки, балансиру, а також забезпечується точне центрування конструкції відносно гирла свердловини
4. Експлуатація	Системи автоматизованого керування роботою свердловинних штангових насосних установок [38][39][40]
Балансуваня приводу, оптимізація режимів	Цифровий двійник СШНУ, створений на основі динамічної моделі, дозволяє виконувати оптимізацію процесів балансування установки [41], а також підбір ефективних режимів відкачування [42][43], у тому числі з використанням динамічних моделей роботи насосної системи
Моніторинг технічного стану	Системи автоматичного контролю продукції забезпечують моніторинг параметрів тиску [44], витрати рідини та температури шляхом збору даних з дистанційних манометрів, витратомірів і температурних сенсорів, встановлених на свердловині. Застосовуються статистичні методи аналізу зібраної інформації для виявлення відхилень у роботі обладнання. Аналіз динамограм, ватметрограм, вібраційних характеристик приводу та редуктора, а також температури і стану мастильних матеріалів у редукторі здійснюється з використанням систем автоматичного контролю якості мастила [45][46][47][48]. Технології моніторингу технічного стану вперше були впроваджені компанією Shell [49].
5.Обслуговування і ремонт	Системи автоматичного контролю дотримання вимог техніки безпеки передбачають перевірку стану захисних огорож, вимкненого режиму обладнання, справності гальмового механізму, наявності попереджувальних написів, а також використання сенсорів для виявлення присутності персоналу в зонах підвищеної небезпеки. Додатково здійснюється контроль функціонування системи заземлення та інших критично важливих елементів безпеки. Для забезпечення належного обслуговування та ремонту СШНУ впроваджуються системи моніторингу технічного стану обладнання. Процес дослідження свердловини автоматизується, зокрема шляхом визначення рівня рідини за допомогою ультразвукових вимірювальних пристроїв (ехолотів). Організація ремонтних майстерень для обслуговування СШНУ та насосів виконується із застосуванням BIM-технологій. Збір інформації про відмови обладнання супроводжується статистичним аналізом відповідних даних [50]. Для проєктування технологічних процесів ремонту використовуються системи автоматизованого проєктування технологій (САПР ТП)
Технічне діагностування	Обробка результатів неруйнівного контролю здійснюється з використанням відповідних аналітичних методів і програмних засобів [51][52][53]. Для ідентифікації критичних сценаріїв відмов застосовується метод аналізу «дерева відмов» [54]. У процесі діагностики використовуються бази знань, що акумулюють інформацію про відмови приводів та свердловинного обладнання [55]

у комплексі з IoT, Big Data, AI та AR/VR істотно підвищує конкурентоспроможність і надійність нафтогазових операцій, забезпечуючи довгострокову економічну й технічну вигоду.

Список використаної літератури

1. Robert J., Kubler S., Kolbe N. Відкрита екосистема IoT для підвищення взаємодії у «розумних» містах: приклад метрополії Ліон // Sensors. 2017. Vol. 17, № 12. С. 2849. Доступно за посиланням: https://www.mdpi.com/1424-8220/17/12/2849.

2. IoT для «розумних» міст: систематичний огляд і перспективи розвитку // Sustainable Technology and Entrepreneurship. 2022. Vol. 1, № 2. Стаття 100089. Доступно: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405656121000891.

3. Davtalab O., Kazemian A. Перспективи BIM-інтегрованої програмної платформи для роботизованого будівництва методом Contour Crafting // Automation in Construction. 2018. Vol. 89. С. 13–23. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.006

4. Огляд застосувань цифрових двійників у виробництві // Computers in Industry. 2020. Vol. 123. Стаття 103216. https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103216

5. Цифрова трансформація у виробництві: Індустрія 4.0 та кіберфізичні системи // IFAC-PapersOnLine. 2020. Vol. 53, № 2. С. 105–110. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.09.037

6. Блокчейн-орієнтований IoT для «розумних» міст: систематичний огляд і перспективи розвитку // Sustainable Technology and Entrepreneurship. 2022. Vol. 1, № 2. Стаття 100089. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405656121000891

7. El-Husseiny A., Vega S., Nizamuddin S. Вплив складності порової структури та історії насичення на зміни акустичної швидкості у карбонатах // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2019. Vol. 179. С. 176–190. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.04.019

8. Li X., Jiang M., Lin C., Chen R. Інтегрована платформа BIM–IoT для оцінювання та відстеження вуглецевих викидів у збірному будівництві // Automation in Construction. 2018. Vol. 89. С. 24–35. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.006

9. Wang S-H., Wang H-P., Wang W-C., Huang S-C. Вплив рівнів використання BIM на показники проєкту: публічні будівництва Тайваню // Journal of the Chinese Institute of Engineers. 2024. Стаття 4052899. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226798824052899.

10. Halliburton. Імерсивні VR-рішення для навчання. Доступно: https://www.halliburton.com/en/news-releases/halliburton-immersive-vr-training-solutions

11. TotalEnergies. Інновації. https://www.totalenergies.com/innovation

12. ExxonMobil. Новини. https://corporate.exxonmobil.com/news

13. TotalEnergies. Інновації. https://www.totalenergies.com/innovation

14. Shokri R., Theodorakopoulos G., Troncoso C. Ігри конфіденційності уздовж маршрутів місцеположення: ігрова модель оптимізації просторової приватності // ACM Transactions on Privacy and Security. 2016. Vol. 19, № 4. Стаття 11. https://www.researchgate.net/publication/311759480

15. BP. Цифрова трансформація. https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/reimagining-energy/bp-digital-transformation.html

16. Chevron. Ініціативи зі штучного інтелекту для підвищення операційної ефективності. https://www.chevron.com/technology/chevrons-ai-initiatives-for-enhanced-operational-efficiency

17. Halliburton. Імерсивні VR-рішення для навчання. https://www.halliburton.com/en/news-releases/halliburton-immersive-vr-training-solutions

18. Копей В. Б., Палійчук І. І. Застосування Python для побудови баз знань з надійності ШСНУ // Нафтогазова енергетика. 2011. № 2(15). С. 12–18.

19. Hoffman E. L. Скінченно-елементний аналіз муфт насосних штанг з рекомендаціями щодо підвищення втомної довговічності. Sandia Report. 1997. 66 с.

20. Копей В. Б. Розроблення та аналіз параметричних CE-моделей різьбових з'єднань в Abaqus® // Нафтогазова енергетика. 2010. № 1(12). С. 31–36.

21. Wang S., Rowlan L., Cook D. та ін. Динаміка балансира насосних установок: теорія та експерименти // Upstream Oil and Gas Technology. 2023. Vol. 11. Стаття 100097.

22. Takacs G. Точний кінематичний і крутильний аналіз насосних установок Rotaflex // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2014. Vol. 115. С. 11–16.

23. Копей В. Б. Науково-методологічні основи автоматизованого проєктування обладнання ШСНУ: дис. … д-ра техн. наук. Івано-Франківськ, 2009. 2 ч.

24. Gibbs S. G. Штангове насосне обладнання: сучасні методи проєктування, діагностики та нагляду. 2012. 660 с.

25. Wang S., Rowlan L., Cook D. та ін. Вплив типів з'єднань штанг на динаміку балансира // Petroleum Research. 2024. Стаття 100097.

26. Eisner P., Langbauer C., Fruhwirth R. K. Порівняння нового FEM-підходу для визначення динамометричних карт // Upstream Oil and Gas Technology. 2022. Vol. 9. Стаття 100078.

27. Yin J-J., Sun D., Yang Y-S. Прогнозування багатозонних ШСНУ за аналітичним розв'язком // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 197. Стаття 108115.

28. Lv X., Wang H., Zhang X. та ін. Еквівалентна модель вібрацій для гібридних волоконних штанг // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 207. Стаття 109148.

29. Miska S., Sharaki A., Rajtar J. Модельна оптимізація ШСНУ // Journal of Petroleum Science and Engineering. 1997. Vol. 17, № 3–4. С. 303–312.

30. Копей В. Б., Копей Б. В., Кузьмін О. О. Побудова моделі ШСНУ у MapleSim 7 // Науковий вісник ІФНТУНГ. 2017. № 2(43). С. 42–52.

31. Rischmüller G., Mayer H. Видобування нафт штанговими насосами. Ternitz: Schoeller-Blackman GmbH, 1988. 150 с.

32. Копей В. Б. Прогнозування циклічної довговічності штанг на основі ML // Engineering Fracture Mechanics. 2023. Vol. 283. Стаття 109161.

33. Tian H., Deng S., Wang C., Ni X. Прогнозування відкладень парафіну у ШСНУ на основі CNN // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 206. Стаття 108986.

34. Zhang O. Контроль дефектів штанг методом витоку магнітного потоку // Journal of Software. 2019. Vol. 11, № 4.

35. Hansen B., Tolbert B., Vernon C., Hedengren J. D. MPC-керування ШСНУ: симуляційне дослідження // Computers & Chemical Engineering. 2019. Vol. 121. С. 265–284.

36. Torres L. H. S., Schnitman L. Моделювання та керування ШСНУ // IFAC Proceedings Volumes. 2013. Vol. 46, № 24. С. 260–265.

37. Torres L. H. S., Schnitman L., de Souza J. A. M. Адаптивне керування на основі еталонної моделі для ШСНУ // IFAC Proceedings Volumes. 2010. Vol. 43, № 17. С. 231–236.

38. Takacs G., Kis L. Оптимальне зрівноважування насосних установок із розрахунком крутного моменту // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Vol. 205. Стаття 108792.

39. Takács G. Критичний аналіз енергетичних умов ШСНУ // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. Vol. 210. Стаття 110061.

40. Liu X., Qi Y. Сучасний підхід до вибору ШСНУ в вугільних пластах // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2011. Vol. 76, № 3–4. С. 100–108.

41. Codas A., Ordoñez B., Moreno U. F. Виявлення та ізоляція несправностей ШСНУ за вибійним тиском // IFAC Proceedings Volumes. 2009. Vol. 42, № 8. С. 1031–1036.

42. Lv X., Feng L., Wang H., Liu Y., Sun B. Кількісна діагностика ШСНУ за механізмом несправностей // Journal of Process Control. 2021. Vol. 104. С. 40–53.

43. Zhang R., Yin Y., Xiao L., Chen D. Оперативна діагностика системи пласт–свердловина–поверхня для Ш

44. Huang Z., Li K., Xu Z., Yin R., Yang Z., Mei W., Bing S. STP-Model: напівконтрольована схема з самонавчанням для діагностики несправностей глибинних систем ШСНУ // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2024. Т. 135. Стаття 108802. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108802

45. Lv X., Wang H., Zhang X., Liu Y., Jiang D., Wei B. Еволюційний метод SVM для діагностики несправностей у системах ШСНУ // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2021. Т. 203. Стаття 108806. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108806

46. Лопатін В. В. Наукові основи розроблення системи контролю технічного стану жорсткого армування шахтних стовбурів: дис. … д-ра техн. наук. Дніпро, 2012. 392 с.

47. Chu X., Wang X., Xie Y., Xing G., Chen L. Виявлення асоціативних правил для довготривалої роботи ШСНУ // Reliability Engineering & System Safety. 2024. Т. 245. Стаття 110026. https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110026

48. Botvina L. R., Tyutin M. R., Sinev I. O., Bolotnikov A. I. Вплив попереднього циклічного навантаження на акустичні параметри та пошкодження сталей // Procedia Structural Integrity. 2020. Т. 28. С. 2118–2125. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.038

49. Zhang O. Контроль дефектів тіла штанги методом витоку магнітного потоку // Journal of Software. 2019. Т. 11, № 4.

50. Копей Б. В., Копей В. Б., Мартинець О. Р., Стефанишин О. І., Стефанишин А. Б. Застосування «дерева відмов» для аналізу ШСНУ // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2013. № 2(47). С. 62–71.

51. Jiang J., Wan X., Li K., Du J., Liu Y., Jing J., Li J. Огляд методів виявлення та прогнозування руйнування насосних штанг // Engineering Failure Analysis. 2024. Т. 159. Стаття 108119. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108119

52. Копей В. Б., Онисько О. Р., Панчук В. Г. Принципи розроблення PLM-системи для різьбових з'єднань з використанням Python // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Т. 1426. Стаття 012033. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1426/1/012033

53. Rischmüller G., Mayer H. Видобування нафти штанговими насосами. Ternitz : Schoeller-Blackman GmbH, 1988. 150 с.

54. He Y-P., Cheng H-B., Zeng P. та ін. Розпізнавання режимів роботи ШСНУ на основі 4-вимірної ознаки та глибинного навчання // Petroleum Science. 2024. Т. 21, № 1. С. 641– 653. https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.08.031

55. He Y-P., Zang C-Z., Zeng P., Wang M-X., Dong Q-W., Wan G-X., Dong X-T. Few-shot розпізнавання режимів роботи ШСНУ // Petroleum Science. 2023. Т. 20, № 2. С. 1142–1154. https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.02.017

56. Lv X-X., Wang H-X., Xin Z., Liu Y-X., Zhao P-C. Адаптивна діагностика несправностей ШСНУ на основі оптимального перцептрона // Petroleum Science. 2022. Т. 19, № 2. С. 743– 760. https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.09.012

57. Correia da Silva D., de Araújo C. R. B., de Oliveira Freitas J. C. та ін. Нові мікроемульсійні системи для видалення фільтрувального осаду // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020. Т. 193. Стаття 107425. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107425

58. Zheng B., Gao X., Li X. Виявлення несправностей ШСНУ за споживаною потужністю двигуна // Control Engineering Practice. 2019. Т. 86. С. 37–47. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.02.001.

59. Zhang O. Контроль дефектів тіла штанги методом витоку магнітного потоку // Journal of Software. 2019. Т. 11, № 4.

References

1. Robert, J., Kubler, S., & Kolbe, N. (2017). Open IoT ecosystem for enhanced interoperability in smart cities: Example of Métropole de Lyon. Sensors, 17(12), 2849. https://www.mdpi.com/1424-8220/17/12/2849

2. Blockchain-driven IoT for smart cities: Systematic review and future directions. (2022). Sustainable Technology and Entrepreneurship, 1(2), 100089. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405656121000891

3. Davtalab, O., & Kazemian, A. (2018). Perspectives on a BIM-integrated software platform for robotic construction through Contour Crafting. Automation in Construction, 89, 13–23. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.006

4. A review of digital twin applications in manufacturing. (2020). Computers in Industry, 123, 103216. https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103216

5. Digital transformation in manufacturing: Industry 4.0 and cyber-physical systems. (2020). IFAC- PapersOnLine, 53(2), 105–110. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.09.037

6. Blockchain-driven IoT for smart cities: Systematic review and future directions. (2022). Sustainable Technology and Entrepreneurship, 1(2), 100089. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405656121000891

7. El-Husseiny, A., Vega, S., & Nizamuddin, S. (2019). Effect of pore-structure complexity and saturation history on acoustic-velocity variations in carbonates. Journal of Petroleum Science and Engineering, 179, 176–190. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.04.019

8. Li, X., Jiang, M., Lin, C., & Chen, R. (2018). Integrated BIM–IoT platform for carbon- emission assessment in prefabricated building materialization. Automation in Construction, 89, 24–35. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.006

9. Wang, S.-H., Wang, H.-P., Wang, W.-C., & Huang, S.-C. (2024). Impact of BIM usage levels on project performance: Public-construction projects in Taiwan. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 4052899. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1226798824052899

10. Halliburton. (n.d.). Halliburton immersive VR training solutions. https://www.halliburton.com/en/news- releases/halliburton-immersive-vr-training-solutions

11. TotalEnergies. (n.d.). Innovation. https://www.totalenergies.com/innovation

12. ExxonMobil. (n.d.). News. https://corporate.exxonmobil.com/news

13. TotalEnergies. (n.d.). Innovation. https://www.totalenergies.com/innovation

14. Shokri, R., Theodorakopoulos, G., & Troncoso, C. (2016). Privacy games along location traces: A game-theoretic framework for optimizing location privacy. ACM Transactions on Privacy and Security, 19(4), 11. https://www.researchgate.net/publication/311759480

15. BP. (n.d.). BP digital transformation. https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/reimagining-energy/bp-digital-transformation.html

16. Chevron. (n.d.). Chevron's AI initiatives for enhanced operational efficiency. https://www.chevron.com/technology/chevrons-ai-initiatives-for-enhanced-operational-efficiency

17. Halliburton. (n.d.). Halliburton immersive VR training solutions. https://www.halliburton.com/en/news-releases/halliburton-immersive-vr-training-solutions

18. Kopei, V. B., & Paliichuk, I. I. (2011). Application of the Python programming language for building knowledge bases on reliability and durability of sucker-rod pumping units. Naftohazova Enerhetyka, 2(15), 12–18.

19. Hoffman, E. L. (1997). Finite element analysis of sucker rod couplings with guidelines for improving fatigue life (Sandia report). Albuquerque: Sandia National Laboratories.

20. Kopei, V. B. (2010). Development and analysis of parametric finite-element models of threaded connections in Abaqus®. Naftohazova Enerhetyka, 1(12), 31–36.

21. Wang, S., Rowlan, L., Cook, D., Conrady, C., King, R., & Taylor, C. A. (2023). Dynamics of pump jacks with theories and experiments. Upstream Oil and Gas Technology, 11, 100097. https://doi.org/10.1016/j.upstre.2023.100097

22. Takacs, G. (2014). Exact kinematic and torsional analysis of Rotaflex pumping units. Journal of Petroleum Science and Engineering, 115, 11–16. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2014.02.008

23. Kopei, V. B. (2009). Scientific and methodological bases for automated design of sucker-rod pumping-unit equipment (Doctoral dissertation, 2 vols.). Ivano-Frankivsk: IFNTUOG.

24. Gibbs, S. G. (2012). Rod pumping: Modern methods of design, diagnosis and surveillance. [B.m.]: Author.

25. Wang, S., Rowlan, L., Cook, D., Conrady, C., King, R., & Taylor, C. A. (2024). Effects of rod-connection types on pump-jack dynamics. Petroleum Research, 100097. https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2024.04.001

26. Eisner, P., Langbauer, C., & Fruhwirth, R. K. (2022). Novel FEM for sucker-rod-pump downhole dynamometer-card determination. Upstream Oil and Gas Technology, 9, 100078. https://doi.org/10.1016/j.upstre.2022.100078

27. Yin, J.-J., Sun, D., & Yang, Y.-S. (2021). Predicting multi-tapered sucker-rod pumping systems with an analytical solution. Journal of Petroleum Science and Engineering, 197, 108115. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108115

28. Lv, X., Wang, H., Zhang, X., Liu, Y., & Chen, S. (2021). Equivalent vibration model for carbon/glass hybrid-fibre sucker-rod pumping systems. Journal of Petroleum Science and Engineering, 207, 109148. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109148

29. Miska, S., Sharaki, A., & Rajtar, J. M. (1997). Computer-aided optimisation of sucker-rod pumping systems. Journal of Petroleum Science and Engineering, 17(3–4), 303–312. https://doi.org/10.1016/S0920-4105(96)00071- X

30. Kopei, V. B., Kopei, B. V., & Kuzmin, O. O. (2017). Building a sucker-rod pumping-unit model in Maplesoft MapleSim 7. Naukovyi Visnyk IFNTUOG, 2(43), 42–52.

31. Rischmüller, G., & Mayer, H. (1988). Oil recovery by sucker-rod pumps (150 pp.). Ternitz : Schoeller-Blackman GmbH.

32. Kopei, V. B. (2023). Machine-learning-based prediction of cyclic durability of sucker rods. Engineering Fracture Mechanics, 283, 109161. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109161

33. Tian, H., Deng, S., Wang, C., & Ni, X. (2021). CNN-based paraffin-deposit prediction in sucker-rod pumping systems. Journal of Petroleum Science and Engineering, 206, 108986. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108986

34. Zhang, O. (2019). Magnetic-flux-leakage testing for defects of sucker-rod bodies. Journal of Software, 11(4). http://dx.doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.201804036

35. Hansen, B., Tolbert, B., Vernon, C., & Hedengren, J. D. (2019). Model-predictive automatic control of sucker-rod-pump systems: Simulation case study. Computers & Chemical Engineering, 121, 265–284. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.08.018

36. Torres, L. H. S., & Schnitman, L. (2013). Modelling and control of sucker-rod pumping systems. IFAC Proceedings Volumes, 46(24), 260–265. https://doi.org/10.3182/20130911-3-BR- 3021.00052

37. Torres, L. H. S., Schnitman, L., & Felippe de Souza, J. A. M. (2010). Model-reference adaptive control for sucker-rod-pump systems. IFAC Proceedings Volumes, 43(17), 231–236. https://doi.org/10.3182/20100908-3-PT- 3007.00045

38. Takacs, G., & Kis, L. (2021). Optimum counterbalancing of sucker-rod pumping units. Journal of Petroleum Science and Engineering, 205, 108792. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108792

39. Takács, G. (2022). Critical analysis of power conditions in sucker-rod pumping systems. Journal of Petroleum Science and Engineering, 210, 110061. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.110061

40. Liu, X., & Qi, Y. (2011). Selecting sucker-rod pumping systems in CBM wells. Journal of Petroleum Science and Engineering, 76(3–4), 100–108. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.01.012

41. Codas, A., Ordoñez, B., & Moreno, U. F. (2009). Fault detection and isolation in sucker-rod pumping systems using bottom-hole pressure. IFAC Proceedings Volumes, 42(8), 1031–1036. https://doi.org/10.3182/20090630-4-ES-2003.00170

42. Lv, X., Feng, L., Wang, H., Liu, Y., & Sun, B. (2021). Quantitative diagnosis of sucker-rod pumping systems via inversion algorithms. Journal of Process Control, 104, 40–53. https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2021.06.001

43. Zhang, R., Yin, Y., Xiao, L., & Chen, D. (2021). Real-time diagnosis of reservoir–wellbore– surface conditions in sucker-rod-pump wells. Journal of Petroleum Science and Engineering, 198, 108254. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108254

44. Huang, Z., Li, K., Xu, Z., Yin, R., Yang, Z., Mei, W., & Bing, S. (2024). STP-Model: Semi- supervised downhole fault diagnosis for sucker-rod pumping systems. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 135, 108802. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108802

45. Lv, X., Wang, H., Zhang, X., Liu, Y., Jiang, D., & Wei, B. (2021). Evolutionary SVM for fault diagnosis in sucker-rod pumping systems. Journal of Petroleum Science and Engineering, 203, 108806. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.108806

46. Lopatin, V. V. (2012). Scientific principles for developing a condition-monitoring system for rigid mine-shaft reinforcement (Doctoral dissertation). Dnipro: NTU Dnipro.

47. Chu, X., Wang, X., Xie, Y., Xing, G., & Chen, L. (2024). Association-rules mining for long- uptime sucker-rod pumping units. Reliability Engineering & System Safety, 245, 110026. https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110026

48. Botvina, L. R., Tyutin, M. R., Sinev, I. O., & Bolotnikov, A. I. (2020). Acoustic-emission parameters after cyclic loading of structural steels. Procedia Structural Integrity, 28, 2118–2125. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.038

49. Zhang, O. (2019). Magnetic-flux-leakage testing for defects of sucker-rod bodies. Journal of Software, 11(4). http://dx.doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.201804036

50. Kopei, B. V., Kopei, V. B., Martynets, O. R., Stefanyshyn, O. I., & Stefanyshyn, A. B. (2013). Fault-tree analysis for sucker-rod pumping units. Rozvidka ta Rozrobka Naftovykh i Hazovykh Rodovyshch, 2(47), 62–71

51. Jiang, J., Wan, X., Li, K., Du, J., Liu, Y., Jing, J., & Li, J. (2024). Fracture-detection and prediction models for sucker-rod systems: A review. Engineering Failure Analysis, 159, 108119. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108119

52. Kopei, V. B., Onysko, O. R., & Panchuk, V. G. (2020). Product life-cycle management for threaded connections using Python. Journal of Physics: Conference Series, 1426, 012033. https://doi.org/10.1088/1742- 6596/1426/1/012033

53. Rischmüller, G., & Mayer, H. (1988). Oil recovery by sucker-rod pumps (150 pp.). Schoeller- Blackman GmbH.

54. He, Y.-P., Cheng, H.-B., Zeng, P., Zang, C.-Z., Dong, Q.-W., Wan, G.-X., & Dong, X.-T. (2024). Deep-learning-based working-condition recognition in sucker-rod pumping systems. Petroleum Science, 21(1), 641–653. https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.08.031

55. He, Y.-P., Zang, C.-Z., Zeng, P., Wang, M.-X., Dong, Q.-W., Wan, G.-X., & Dong, X.-T. (2023). Few-shot working-condition recognition for sucker-rod pumping systems. Petroleum Science, 20(2), 1142– 1154. https://doi.org/10.1016/j.petsci.2023.02.017

56. Lv, X.-X., Wang, H.-X., Xin, Z., Liu, Y.-X., & Zhao, P.-C. (2022). Adaptive fault diagnosis of sucker-rod pump systems via optimal perceptron. Petroleum Science, 19(2), 743–760. https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.09.012

57. Correia da Silva, D., de Araújo, C. R. B., de Oliveira Freitas, J. C., Rodrigues, M. A. F., & de

58. Oliveira Wanderley Neto, A. (2020). Micro-emulsion systems for removing olefin-based drilling-fluid filter cake. Journal of Petroleum Science and Engineering, 193, 107425. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107425

59. Zheng, B., Gao, X., & Li, X. (2019). Fault detection for sucker-rod pumps based on motor power. Control Engineering Practice, 86, 37–47. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.02.001

60. Zhang, O. (2019). Magnetic-flux-leakage testing for defects of sucker-rod bodies. Journal of Software, 11(4). http://dx.doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.201804036

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 621.9.048.6 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.39

О. В. ШЕВЧЕНКО
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-2015-1239

МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІБРОСТІЙКОСТІ ПРУЖНОЇ СИСТЕМИ ІНСТРУМЕНТУ ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА

В статті розглянуто основні дієві методи забезпечення вібростійкості пружної системи інструменту при токарній обробці, а саме: - зниження жорсткості пружної системи інструменту в напрямку дотичної до оброблювальної поверхні, що призводить до незначного збільшення амплітуди тангенціальних коливань та до зменшення амплітуд коливань різця по нормалі до оброблюваної поверхні; - раціональна орієнтація головних осей жорсткості пружної системи інструменту; - збільшення демпфірування в пружній системі. Для комплексної реалізації вказаних методів забезпечення вібростійкої токарної обробки запропонована оригінальна конструкція різцетримача для токарно-револьверного верстата середнього типорозміру. Різцетримач забезпечує умову відтискання різця від деталі при збільшенні сили різання і достатню величину жорсткості в напрямку нормалі до оброблювальної поверхні. Конструкція різцетримача базується на результатах досліджень твердотільної моделі його пружної частини, формі полярної діаграми її податливості, результатах експериментальних досліджень частотних характеристик дослідного зразка на верстаті. Порівняння амплітудно-частотних характеристик коливань пружної частини різцетримача та зібраної конструкції дає можливість зробити висновок, що використання демпфера є ефективним для гасіння коливань в достатньо широкому діапазоні частот включно з частотою вільних коливань пружної частини різцетримача. Відповідно, використання демпферу забезпечує відсутність резонансних ефектів між власними коливаннями пружної частини різцетримача та вимушеними коливаннями при різанні, що є одним із чинників забезпечення вібростійкого різання. Результати виконаних розрахунків та експериментальних досліджень дозволяють рекомендувати інструментальне оснащення такого типу для токарної обробки важкооброблювальних матеріалів та деталей з переривчатими поверхнями.

Ключові слова: *вібростійка токарна обробка, різцетримач з пружними елементами та демпфером.*

O. V. SHEVCHENKO
Doctor of Science in Mechanical Engineering,
Professor at the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0003-2015-1239

METHODS OF ENSURING VIBRATION RESISTANCE OF THE ELASTIC SYSTEM OF THE LATHE TOOL

The article considers the main effective methods for ensuring the vibration resistance of the elastic system of the cutting tool during turning, namely: - reducing the rigidity of the elastic system of the tool in the direction tangent to the machined surface, which leads to a slight increase in the amplitude of tangential vibrations and to a decrease in the amplitude of the tool oscillations normal to the machined surface; - rational orientation of the main axes of the rigidity of the elastic system of the tool; - increasing damping in the elastic system. For the comprehensive implementation of the specified methods for ensuring vibration-resistant turning, an original design of a toolholder for a turret lathe is proposed. The toolholder provides the condition for pressing the cutter away from the part with an increase in cutting force and a sufficient amount of rigidity in the direction normal to the machined surface. The design of the toolholder is based on the results of research of the solid-state model of its elastic part, the shape of the polar diagram of its compliance, the results of experimental research of the frequency characteristics of the toolholder prototype on the machine tool. Comparison of the amplitude-frequency characteristics of the oscillations of the elastic part of the toolholder and the assembled structure allows us to conclude that the use of a damper is effective for damping oscillations in a fairly wide frequency range, including the frequency of free oscillations of the elastic part of the toolholder. Accordingly, the use of a damper ensures the absence of resonance effects between the natural oscillations of the elastic part of the toolholder and forced oscillations during cutting, which is one of the factors ensuring vibration-resistant cutting. The results of the performed

© Шевченко О. В., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

calculations and experimental research allow us to recommend toolholder of this type for turning difficult-to-machine materials and parts with discontinuous surfaces.

Key words: *vibration-resistant turning, toolholder with elastic elements and damper.*

Постановка проблеми

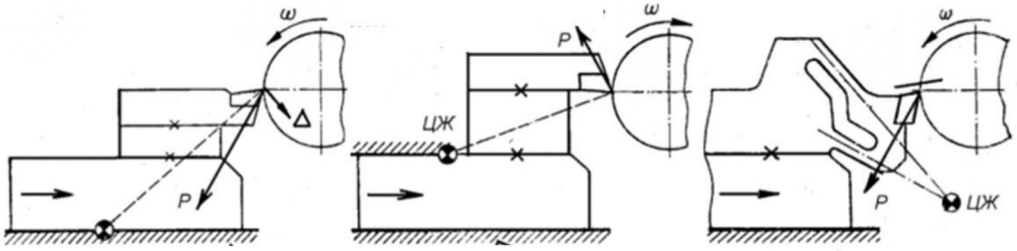
Вібростійкість верстата при різанні характеризує його здатність опиратися виникненню відносних коливань різального інструменту і оброблювальної деталі, що викликані процесом різання та зовнішніми збурюючими впливами.

Основні засоби забезпечення вібростійкості токарних верстатів при різанні, сформульовані в роботах [1, 2], це – оптимальна орієнтація головних осей жорсткості і підбор співвідношень жорсткостей і мас елементів системи; – забезпечення умов, при яких збільшення сили різання викликає відтискання інструменту від оброблюваної деталі; – збільшення демпфірування пружної системи верстата.

Для забезпечення достатньої вібростійкості пружної системи інструменту токарного верстата її жорсткість повинна бути більшою в напрямку нормалі до оброблюваної поверхні, або в напрямку сили різання. В інших напрямках жорсткість та частота власних коливань пружної системи повинна бути меншою, щоб не сприяти втраті вібростійкості внаслідок координатного зв'язку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

При використанні звичайних жорстких конструкцій різцетримачів на токарних автоматах гранична ширина стружки, що знімається поперечними супортами, які працюють «на притискання» (рис. 1, *а*) [2, 3], майже вдвічі менша, ніж супортами, що працюють «на відрив» (рис. 1, *б*). У першому випадку жорсткість пружної системи «від'ємна». Полюс повороту вершини різця відносно оброблюваної деталі, що називається центром жорсткості (ЦЖ), розміщено таким чином, що внаслідок деформації пружної системи при збільшенні сили різання P вершина різця зміщується на величину Δ в матеріал оброблюваної деталі та викликає подальше збільшення сили P. У другому випадку жорсткість «додатна». Із збільшенням сили P вершина різця внаслідок деформації пружної системи відтискається від оброблюваної деталі і сили різання зменшується.



а) б) в)

Рис. 1. Конструктивні схеми різцетримачів

Забезпечення «додатної» жорсткості пружної системи можна досягти використанням різцетримачів з пружними елементами. Вибором напрямку осей пружних елементів можна розмістити ЦЖ зі сторони, наприклад, задньої (рис. 1, *в*) поверхні різця.

Одним із методів забезпечення вібростійкої токарної обробки є метод зниження жорсткості пружної системи інструменту в напрямку дотичної до оброблювальної поверхні, що призводить до незначного збільшення амплітуди тангенціальних коливань [2, 4]. Збільшення в деяких межах амплітуди тангенціальних коливань, дотичних до оброблювальної поверхні, дає позитивний ефект у збільшенні витрат енергії в цьому напрямку та викликає зменшення загальної енергії самозбудження коливань при різанні. Це призводить до зменшення амплітуд коливань різця по нормалі до оброблюваної поверхні і, як наслідок, до підвищення вібростійкості пружної системи інструменту.

Наступним методом підвищення вібростійкості при токарній обробці є раціональна орієнтація головних осей жорсткості пружної системи інструменту [2, 4, 5, 6, 7, 8]. При токарній обробці траєкторія руху вершини різця має форму наближену до еліпсу, головні вісі якого зазвичай не співпадають з узагальненими координатними осями верстата. Крім того, радіальна податливість системи інструменту є різною при різних напрямках навантаження, що обумовлює наявність осей мінімальної та максимальної податливості. Рух за цими осями вважається незалежним, а координати є нормальними або головними. Крім того, параметри податливості, або жорсткості, пружної системи та напрямок осей головних координат є характеристиками пружної системи і не залежать від напрямку зовнішнього навантаження. Таким чином, причинами виникнення координатного зв'язку є наявність взаємозв'язку між узагальненими координатами пружної системи інструменту та розбіжність напрямку дії сили

різання з головними координатами системи. Враховуючи це, зміною напрямку головних координат пружної системи інструменту відносно напрямку дії сили різання можна зменшити енергію самозбудження автоколивань, забезпечити вібростійкий процес різання та підвищити точність обробки.

Ще одним із методів забезпечення вібростійкості верстата при різанні є збільшення демпфірування в його пружній системі [6, 9, 10, 11, 12]. Сутність методу полягає у приєднанні до коливального об'єкта додаткових елементів з метою зміни характеру його коливань. При приєднанні до об'єкта гасника коливань зміна характеру коливань відбувається за рахунок збільшення розсіювання енергії коливань, що базується на дисипативних властивостях спеціальних демпфіруючих елементів-поглиначів коливань. Їх застосування доцільне, коли на об'єкт діють коливання широкого частотного діапазону.

Визначимо статичну характеристику пружної системи інструменту токарного верстата без врахування сил тертя та за умови, що вона має дві взаємно перпендикулярні вісі головних координат O_{η_1} і O_{η_2} з лінійними характеристиками жорсткості c_{η_1} і c_{η_2} [1, 2, 5, 7]. За початок координат *O* прийнято вершину різця, вісь *y* направлена по нормалі до оброблюваної поверхні, а вісь *z* перпендикулярно до осі *y* і є дотичною до оброблювальної поверхні (рис. 2).

Головні вісі координат O_{η_1} і O_{η_2} орієнтовані під кутом β до узагальненої системи координат *yOz*. Сила різання *P*, прикладена до вершини різця під кутом α. Припускається, що різець рухається тільки в напрямках головних осей координат O_{η_1} і O_{η_2}.

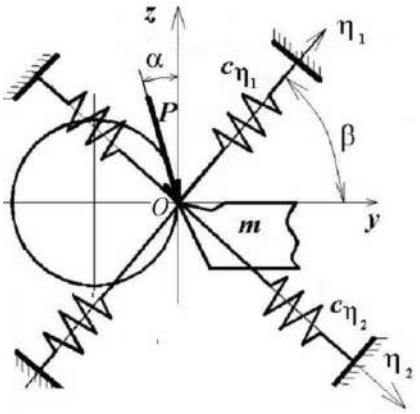


Рис. 2. Розрахункова схема для визначення статичної характеристики пружної системи інструменту в площині *yOz*

Статична характеристику пружної системи інструменту визначається за наступним виразом [1, 8, 9]:

$$K_{ПС} = y/P = \cos(\beta - \alpha) \cdot \sin\beta / c_{\eta_2} - \sin(\beta - \alpha) \cdot \cos\beta / c_{\eta_1}. \quad (1)$$

Якщо встановити діапазон значень коефіцієнтів жорсткості c_{η_1} і c_{η_2} пружної системи інструменту в напрямку головних осей координат O_{η_1} і O_{η_2}, то за допомогою виразу (1) є можливість визначити діапазон значень кута β розвороту головних осей координат пружної системи, при якому ця система буде мати найменшу радіальну податливість і відповідно буде забезпечена найбільша точність та вібростійкість обробки.

Викладення основного матеріалу дослідження

У випадку, коли співвідношення жорсткостей пружної системи супортної групи верстата конструктивно є незмінним і підвищити амплітуди дотичних коливань різця за рахунок зниження жорсткості дотичного контуру не вдається, пропонується ввести додатковий дотичний контур пониженої жорсткості використовуючи спеціальні конструкції різцетримачів.

Такі конструкції різцетримачів повинні забезпечувати «додатну» жорсткість пружної системи інструменту, а саме, коли збільшення сили різання призводить до відтискання різця від деталі, і достатню величину жорсткості в напрямку нормалі до оброблювальної поверхні.

На рис. 3, *а* наведено твердотільну модель пружної частини різцетримача. До конструкції пружної частини додано хвостовик, що визначає положення його нерухомої частини під час навантаження пружної частини силою різання.

Для визначення особливостей конструкції пружної частини різцетримача виконано розрахунок полярної діаграми податливості в площині ZOY, положення якої визначається напрямком складових сили різання P_z та P_y (рис. 3, *б*).

Навантаження пружної частини різцетримача здійснено силою P = 500 Н, прикладеною в точці різання. При цьому напрямок дії сили *P* відносно координатних осей в площині ZOY змінюється 12 разів через 30°. Для кожного напрямку дії сили *P* визначаються пружні деформації в точці прикладання сили за напрямками осей *OY* та *OZ*.

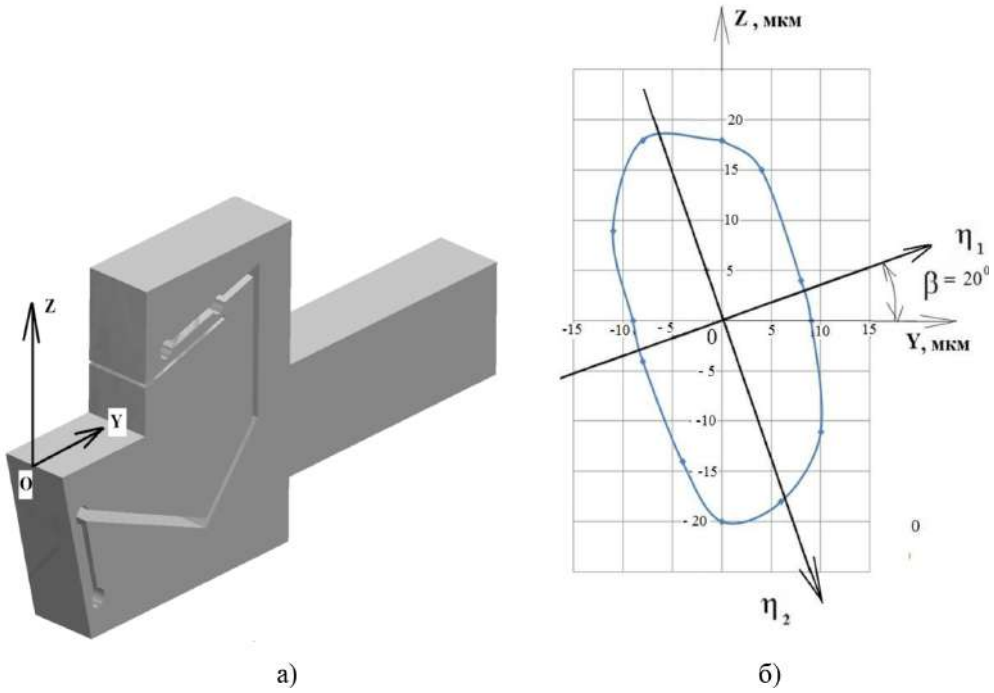


Рис. 3. Модель пружної частини різцетримача (а) та полярна діаграма її податливості (б)

Аналіз форми полярної діаграми податливості пружної частини різцетримача дозволяє зробити наступні висновки: – кут розвороту головних осей жорсткості O_{η_1} і O_{η_2} дорівнює $\beta = 20°$; – жорсткість в напрямку осі O_{η_1} $c_{\eta_1} = 56$ Н/мкм; – жорсткість в напрямку осі O_{η_2} $c_{\eta_2} = 26$ Н/мкм.

Вираз для пружного переміщення інструменту в напрямку нормалі до оброблюваної поверхні має вигляд:

$$y = y_2 + y_1 = \eta_2 \cdot \sin\beta + \eta_1 \cdot \cos\beta. \quad (2)$$

Визначимо переміщення інструменту в напрямку нормалі до оброблюваної поверхні при напрямку дії сили різання P $\alpha = 30°$.

У відповідності до виразів (1) і (2) отримуємо наступний результат:

$$y = y_2 + y_1 = 6{,}74 - (-1{,}46) = 8{,}2 \text{ мкм}.$$

Відповідно до цього розрахункове значення статичної характеристики пружної системи інструменту дорівнює $K_{ПС} = 0{,}0164$ мкм/Н.

Додатне значення статичної характеристики пружної системи інструменту та величина і напрямок розвороту головних осей жорсткості пружної системи інструменту (O_{η_1} і O_{η_2}, $\beta = 20°$) забезпечують умову відтискання різця від оброблюваної поверхні при збільшенні сили різання, що є однією із умов вібростійкої обробки.

Нижча жорсткість в напрямку осі O_{η_2} ($c_{\eta_2} = 26$ Н/мкм) по відношенню до жорсткості в напрямку осі O_{η_1} ($c_{\eta_1} = 56$ Н/мкм) забезпечує умову відсутності між цими осями координатного зв'язку і частково збільшує амплітуду коливань дотичного контуру пружної системи інструменту, що створює умову для встановлення елементу гасіння тангенціальних коливань різця.

На рис. 4 наведено загальний вигляд різцетримача токарно-револьверного верстата, у якого між корпусом 1, що встановлюється в револьверну головку верстата, та пружною частиною 2, вмонтовано демпфер 3 [7].

Для подальшого моделювання динамічних процесів при обробці різанням з використанням дослідної конструкції різцетримача на стенді (рис. 5) проведено експерименти з визначення частот вільних коливань для пружної частини різцетримача.

Стенд складається з пристосування для затиску пружної частини різцетримача, п'єзоелектричного акселерометру мод. Д13, що встановлено в зоні різальної пластинки, вимірювача вібрацій мод. ВШВ 003 та персонального комп'ютера з програмою спектрального аналізу коливань. Імпульсний вплив на консольну частину різцетримача здійснювався ударом з подальшим записом звукового файлу в програму персонального комп'ютера.

На рис. 6 наведено амплітудно-частотну характеристику вільних коливань пружної частини різцетримача в зоні встановлення різальної пластини в напрямку P_z сили різання.

Аналіз результатів визначення частотних характеристик пружної частини різцетримача дозволяє зробити наступні висновки: – найбільша амплітуда вільних коливань пружної частини різцетримача зареєстрована на

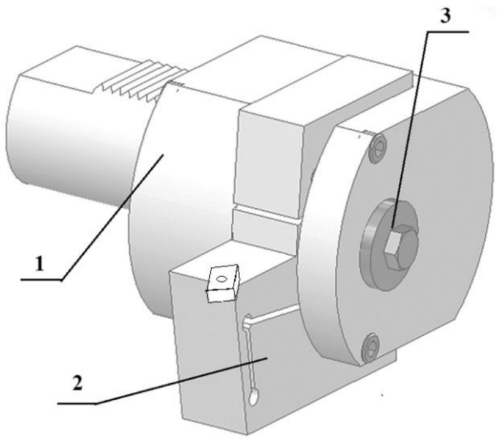


Рис. 4. Загальний вигляд різцетримача з демпфером токарно-револьверного верстата, де 1 – корпус різцетримача, 2 – пружна частина, 3 – демпфер

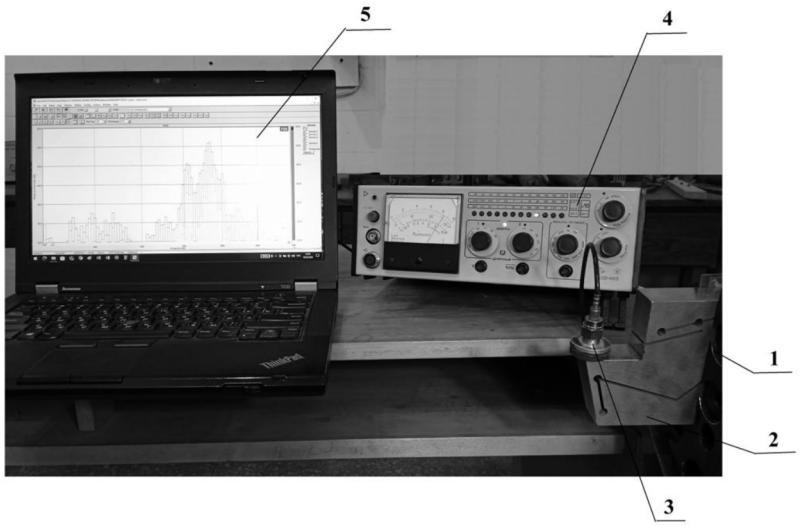


Рис. 5. Стенд ля визначення частот власних коливань пружної частини різцетримача: 1 – місце кріплення; 2 – нерухома частина різцетримача; 3 – п'єзоелектричний акселерометр; 4 – прилад мод. ВШВ 003; 5 – персональний комп'ютер з програмою спектрального аналізу коливань

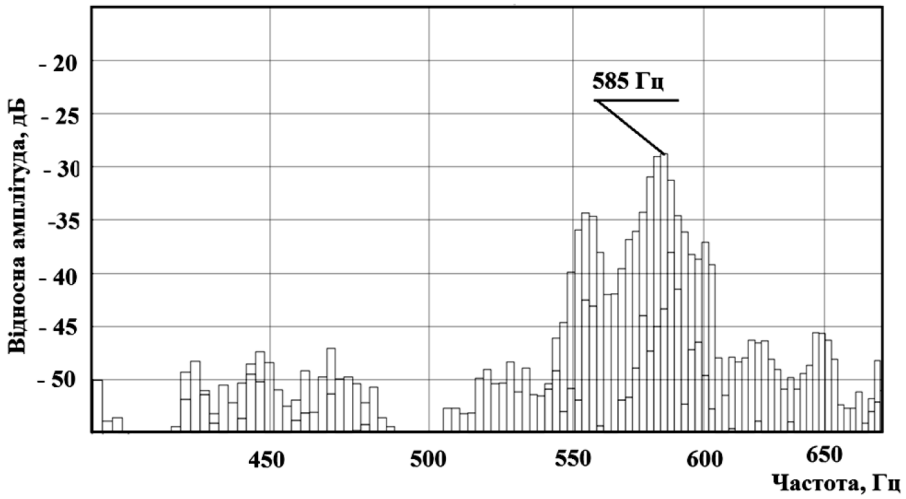


Рис. 6. Амплітудно-частотна характеристика вільних коливань пружної частини різцетримача в напрямку складової P_z сили різання

частоті 585 Гц як для напрямку радіальної складової сили різання P_y, так і для напрямку тангенціальної складової сили різання P_z; – час затухання коливань в напрямку P_y у двічі більший, ніж час затухання коливань в напрямку P_z, що можна пояснити особливостями будови пружної частини різцетримача, призначеного для гасіння коливань в тангенціальному напрямку до оброблюваної поверхні; – отримані результати є попередніми, але дозволять порівняти властивості пружної частини різцетримача до встановлення в корпус із властивостями зібраної конструкції.

На рис. 7 наведено загальний вигляд робочої зони токарно-револьверного верстата із закріпленим в револьверній головці різцетримачам.

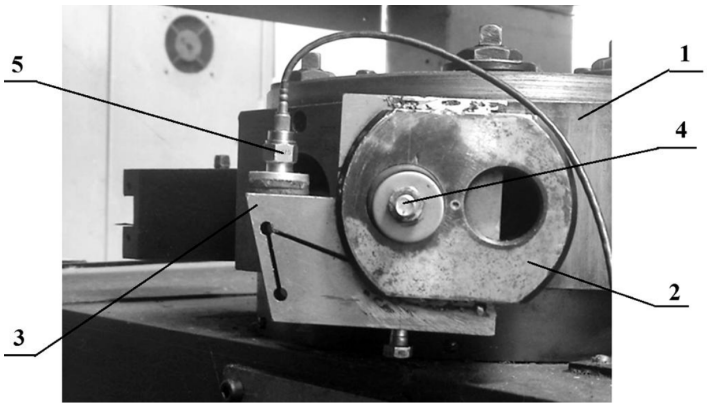


Рис. 7. Різцетримач в робочій зоні верстата: 1 – револьверна головка; 2 – корпус різцетримача; 3 – пружна частина різцетримача; 4 – вісь демпфера; 5 – акселерометр мод. Д13

На рис. 8 наведено приклад амплітудно-частотної характеристики вільних коливань пружної частини різцетримача з демпфером в напрямку складової P_z сили різання.

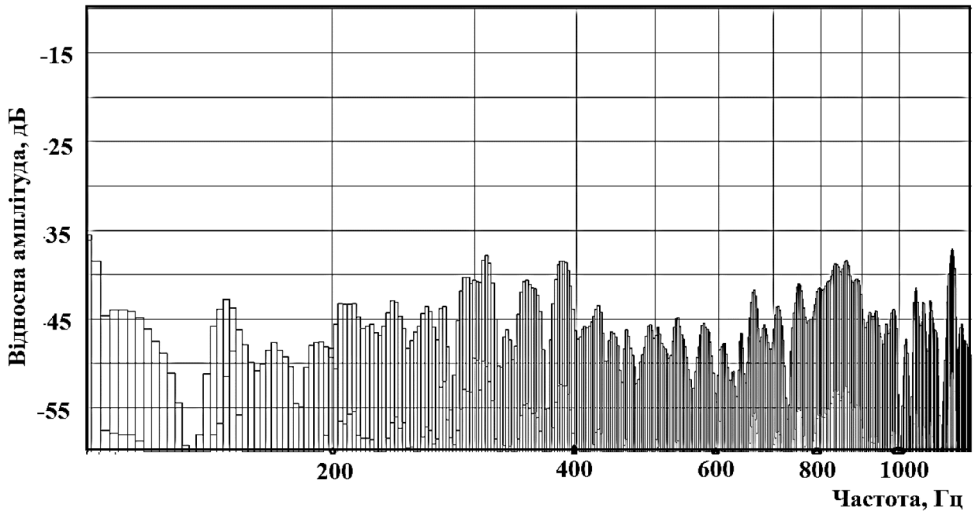


Рис. 8. Амплітудно-частотна характеристика коливань пружної частини різцетримача з демпфером в напрямку складової P_z сили різання

Порівняння амплітудно-частотних характеристик коливань пружної частини різцетримача (рис. 6 та рис. 8) дає можливість зробити висновок, що використання демпфера є ефективним для гасіння коливань в широкому діапазоні частот, який включає частоту вільних коливань пружної частини різцетримача. Відповідно, використання демпферу забезпечує відсутність резонансних ефектів між власними коливаннями пружної частини різцетримача та вимушеними коливаннями при різанні, що є одним із чинників забезпечення вібростійкого різання.

Висновки

Дієвими методами забезпечення режимів вібростійкої токарної обробки є наступні: – зниження жорсткості пружної системи інструменту в напрямку дотичної до оброблювальної поверхні, що призводить до незначного збільшення амплітуди тангенціальних коливань та до зменшення амплітуд коливань різця по нормалі до оброблюваної поверхні; – раціональна орієнтація головних осей жорсткості пружної системи інструменту; – збільшення демпфірування в пружній системі.

Для комплексної реалізації вказаних методів забезпечення вібростійкої токарної обробки пропонується оригінальна конструкція різцетримача для токарно-револьверного верстата середнього типорозміру. Результати виконаних розрахунків та експериментальних досліджень дозволяють рекомендувати інструментальне оснащення такого типу для токарної обробки важкооброблювальних матеріалів та деталей з переривчатими поверхнями.

Список використаної літератури

1. Kuznietsov Yurii, Shevchenko Oleksandr, ŠOOŠ Ľubomir. (2025). Expanding the functionality of lathe toolholders // Strojnícky časopis – Journal of Mechanical Engineering, SjF STU Bratislava, Slovakia, vol. 75, ISSUE 1 (APRIL 2025), p.p. 71–86 (https:// doi.org/10.2478/scjme-2025-0008).

2. Орликов М.Л. Динамика станков: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – Киев : Вища школа, 1989. – 272 с.

3. Vnukov Y., Tryshynh P., Kozlova O, Dyadya S. (2024). Cutter-oscilator with single-degree-of-freedom for the study of cutting vibrations // Strojnícky časopis – Journal of Mechanical Engineering, SjF STU Bratislava, Slovakia, vol. 74 (2024), NO 1, p.p. 169–180 (https:// doi.org/10.2478/scjme-2024-0017).

4. Кузнєцов Ю. М., Луців І. В., Шевченко О. В., Волошин В. Н. Технологічне оснащення для високоефективної обробки деталей на токарних верстатах: Монографія / Упоряд. Кузнєцов Ю. М., – К. – Тернопіль : Терно-граф, 2011. – 692 с.

5. Shevchenko O., Zharov A.A. Effect of orientation of principal axises of stiffness of an elastic-system of the toolholder on a stability of turning process // Вісник НТУУ «КПІ» серія Машинобудування / ММІ НТУУ «КПІ», Вип. 67, Київ, 2013. с. 68–72.

6. Шевченко О. В. Ефективний спосіб підвищення вібростійкості токарної обробки // Технологічні системи / Науково-технічний журнал – Київ : УкрНИАТ, 2011. Вип. 1(54). – с. 60–65.

7. Шевченко О. В., Пирч В. М. Орієнтація пружної системи інструменту токарного верстата / Матеріали 14 Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» – Чернігів, ЧНТУ: 23-24.05.2024. с. 34–36. (https://drive.google.com/file/d/1s2IU7CHhsXHLKxCXEVmEM_AxquSi6b0q/view).

8. Шевченко О. В. Вплив радіальної податливості пружної системи інструменту токарного верстата на точність обробки / Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», секція: Прогресивна техніка та технологія машинобудування – Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського: 06-09.10.2020. с. 106Ц109.

9. Шевченко О. В. Вплив положення головних осей жорсткості пружної системи інструменту на точність токарної обробки. Матеріали 10 Міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» – Чернігів, ЧНТУ: 29–30.04.2020. с. 45–47.

10. Шевченко О. В., Ліщінер-Іващенко О. В. Ефективне гасіння коливань різального інструменту при токарній обробці / Матеріали 16 Міжнародної науково-технічної конференції «Вібрації в техніці та технологіях» – Вінниця : 26.11.–27.11.2017. с. 101–102.

11. Ganguli A., Deraemaeker A., Horodinca M., Preumont A. (2005). Active damping of chatter in machine tools – demonstration with a 'hardware-in-the-loop' simulator. Proc. IMechE Vol. 219 Part I: J. Systems and Control Engineering, p.p. 359–369.

12. Shevchenko O. V., Lishchiner-Ivashchenko O. V. (2021) Chatter stability of the boring bar at turning // Znanstvena misel, № 56/2021, Ljubljana, Slovenia, 2021. p.p. 24–27. (https://ru.scribd.com/document/635968101/Znanstvena-misel-journal-56-2021).

References

1. Kuznietsov Yurii, Shevchenko Oleksandr, ŠOOŠ Ľubomir. (2025). Expanding the functionality of lathe toolholders // Strojnícky časopis – Journal of Mechanical Engineering, SjF STU Bratislava, Slovakia, vol. 75, ISSUE 1 (APRIL 2025), p.p. 71–86 (https:// doi.org/10.2478/scjme-2025-0008). [in English].

2. Orlykov M. L. (1989). Dynamyka stankov [Machine tool dynamics]: Ucheb. posobye dlia vuzov. – 2-e yzd. pererab. y dop. – Kyev : Vyshcha shkola, 272. [in Russian].

3. Vnukov Y., Tryshynh P., Kozlova O, Dyadya S. (2024). Cutter-oscilator with single-degree-of-freedom for the study of cutting vibrations // Strojnícky časopis – Journal of Mechanical Engineering, SjF STU Bratislava, Slovakia, vol. 74, NO 1, p.p. 169–180 (https:// doi.org/10.2478/scjme-2024-0017). [in English].

4. Kuznietsov Yu. M., Lutsiv I. V., Shevchenko O. V., Voloshyn V. N. (2011) Tekhnolohichne osnashchennia dlia vysokoefektyvnoi obrobky detalei na tokarnykh verstatakh [Technological equipment for highly efficient processing of parts on lathes]: Monohrafiia / Uporiad. Kuznietsov Yu. M., – K. – Ternopil : Terno-hraf, – 692. [in Ukrainian].

5. Shevchenko O. V., Zharov A. A. (2013). Effect of orientation of principal axes of stiffness of an elastic-system of the toolholder on a stability of turning process // Bulletin of NTUU “KPI” Series – Mechanical Engineering. Vol. 67, Kyiv. p.p. 68–72. [in English].

6. Shevchenko O. V. (2011). Efektyvnyi sposib pidvyshchennia vibrostiikosti tokarnoi obrobky [An effective method of increasing the vibration resistance of turning processing] // Tekhnolohichni systemy / Naukovo-tekhnichnyi zhurnal - Kyiv : UkrNYAT, 2011. Vyp. 1(54). p.p. 60–65. [in Ukrainian].

7. Shevchenko O. V., Pyrch V. M. (2024). Oriientatsiia pruzhnoi systemy instrumentu tokarnoho verstata [Orientation of the elastic system of a lathe tool] / Materialy 14 Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii “Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system” – Chernihiv, ChNTU: 23–24.05.2024. p.p. 34–36. [in Ukrainian]. (https://drive.google.com/file/d/1s2IU7CHhsXHLKxCXEVmEM_AxquSi6b0q/view).

8. Shevchenko O. V. (2020). Vplyv radialnoi podatlyvosti pruzhnoi systemy instrumentu tokarnoho verstata na tochnist obrobky [Influence of radial compliance of the elastic system of a lathe tool on machining accuracy] / Materialy Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii “Prohresyvna tekhnika, tekhnolohiia ta inzhenerna osvita”, sektsiia: Prohresyvna tekhnika ta tekhnolohiia mashynobuduvannia – Kyiv, KPI im. Ihoria Sikorskoho: 06–09.10.2020. p.p. 106–109. [in Ukrainian].

9. Shevchenko O. V. (2020). Vplyv polozhennia holovnykh osei zhorstkosti pruzhnoi systemy instrumentu na tochnist tokarnoi obrobky [The influence of the position of the main axes of rigidity of the elastic system of the tool on the accuracy of turning] / Materialy 10 Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii “Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system” – Chernihiv, ChNTU: 29–30.04.2020. p.p. 45–47. [in Ukrainian].

10. Shevchenko O. V., Lishchiner-Ivashchenko O. V. (2017). Efektyvne hasinnia kolyvan rizalnoho instrumentu pry tokarnii obrobtsi [Effective damping of cutting tool vibrations during turning] / Materialy 16 Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii “Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh” – Vinnytsia: 26.11.–27.11.2017. p.p. 101–102. [in Ukrainian].

11. Ganguli A., Deraemaeker A., Horodinca M., Preumont A. (2005). Active damping of chatter in machine tools – demonstration with a ‘hardware-in-the-loop’ simulator. Proc. IMechE Vol. 219 Part I: J. Systems and Control Engineering, p.p. 359–369. [in English].

12. Shevchenko O. V., Lishchiner-Ivashchenko O. V. (2021) Chatter stability of the boring bar at turning // Znanstvena misel, № 56/2021, Ljubljana, Slovenia, p.p. 24–27. (https://ru.scribd.com/document/635968101/Znanstvena-misel-journal-56-2021). [in English].

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 23.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

ТЕХНОЛОГІЯ ЛЕГКОЇ ТА ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 677.027.625 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.40

Т. С. АСАУЛЮК
кандидат технічних наук,
науковий співробітник науково-дослідного сектору
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-5961-6895

Ю. Г. САРІБЄКОВА
доктор технічних наук, професор,
головний науковий співробітник науково-дослідного сектору
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-6430-6509

І. М. КУЛІШ
кандидат технічних наук, доцент,
завідувач аспірантури і докторантури
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-0961-5904

І. В. ГОРОХОВ
науковий співробітник науково-дослідного сектору
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-9483-4123

О. Я. СЕМЕШКО
доктор технічних наук, старший дослідник,
професор кафедри хімічних технологій, експертизи
та безпеки харчової продукції
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-8309-5273

ВПЛИВ МОДИФІКАЦІЇ ОРГАНОСІЛАНОМ НА ВЛАСТИВОСТІ ПОВЕРХНІ СИНТЕЗОВАНИХ НАНОЧАСТИНОК ZNO

Дослідження спрямоване на вирішення проблеми забезпечення пролонгованої антимікробної дії композитних покриттів для текстильних матеріалів. Запропоновано застосування наночастинок ZnO, *модифікованих біфункціональним органосіланом, у складі полімерно-колоїдних опоряджувальних композицій для заключної обробки тканин.*

У роботі представлені результати дослідження впливу поверхневої модифікації органосіланом наночастинок ZnO, *попередньо синтезованих удосконаленим ресурсозберігаючим методом прямого осадження із водного розчину. Як модифікуючий агент обрано 3-гліцидоксипропілтриметоксисилан (GPTMS), який окрім метокси-груп містить епоксидну функціональну групу. Кількість GPTMS для модифікації становила 1,5 ммоль в розрахунку на 1 г синтезованих наночастинок* ZnO. *Реакція модифікації проводилась при температурі 70 °С протягом 3 годин з наступним осадженням, промиванням і висушуванням наночастинок. Оцінювання модифікованих зразків* ZnO *здійснювалось шляхом дослідження морфологічної структури наночастинок за допомогою електронної скануючої мікроскопії (СЕМ) і елементного аналізу методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDX). За результатами аналізу мікрофотографій встановлено, що модифікація обраним органосіланом сприяє зниженню ступеня агломерації наночастинок* ZnO. *Дослідження елементного складу показало наявність* Si *у модифікованому зразку* ZnO, *що підтверджує утворення шару органосілану на поверхні наночастинок.*

Обґрунтовано наукову гіпотезу щодо підвищення стійкості іммобілізації нанонаповнювача у акриловій полімерній матриці шляхом введення епоксидної функціональної групи в результаті поверхневої модифікації наночастинок ZnO *3-гліцидоксипропілтриметоксисиланом.*

Ключові слова: *наночастинки* ZnO, *модифікація, 3-гліцидоксипропілтриметоксисилан, морфологічна структура, елементний аналіз.*

© Асаулюк Т. С., Сарібєкова Ю. Г., Куліш І. М., Горохов І. В., Семешко О. Я., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

T. S. ASAULYUK
Candidate of Technical Science, Researcher of Research Sector
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-5961-6895

YU. G. SARIBYEKOVA
Doctor of Technical Science, Professor,
Chief Researcher of Research Sector
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-6430-6509

I. M. KULISH
Candidate of Technical Science, Associate Professor,
Head of Postgraduate and Doctoral Studies
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-0961-5904

I. V. HOROKHOV
Researcher of Research Sector
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-9483-4123

O. YA. SEMESHKO
Doctor of Technical Science, Senior Researcher,
Professor at the Department of Chemical Technologies, Expertise
and Food Safety
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-8309-5273

EFFECT OF ORGANOSILANE MODIFICATION ON THE SURFACE PROPERTIES OF SYNTHESIZED ZNO NANOPARTICLES

The research is aimed at addressing the problem of ensuring prolonged antimicrobial action of composite coatings for textile materials. The application of ZnO *nanoparticles modified with a bifunctional organosilane within polymer-colloidal finishing compositions for the final treatment of fabrics is proposed.*

The paper presents the results of a study on the effect of organosilane surface modification on ZnO *nanoparticles, which were preliminarily synthesized using an improved resource-saving direct precipitation method from an aqueous solution. 3-glycidoxypropyltrimethoxysilane (GPTMS) was selected as the modifying agent, which contains an epoxy functional group in addition to methoxy groups. The amount of GPTMS used for modification was 1.5 mmol per 1 g of synthesized* ZnO *nanoparticles. The modification reaction was carried out at a temperature of 70 °C for 3 hours, followed by precipitation, washing, and drying of the nanoparticles. Evaluation of the modified* ZnO *samples was conducted by studying the morphological structure of the nanoparticles using scanning electron microscopy (SEM) and elemental analysis by energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). Analysis of the micrographs established that modification with the selected organosilane promotes a reduction in the degree of agglomeration of* ZnO *nanoparticles. Elemental composition analysis revealed the presence of* Si *in the modified* ZnO *sample, confirming the formation of an organosilane layer on the nanoparticle surface.*

The scientific hypothesis regarding the enhancement of nanofiller immobilization stability in the acrylic polymer matrix through the introduction of an epoxy functional group as a result of surface modification of ZnO *nanoparticles with 3-glycidoxypropyltrimethoxysilane is substantiated.*

Key words: ZnO *nanoparticles, modification, 3-glycidoxypropyltrimethoxysilane, morphological structure, elemental analysis.*

Постановка проблеми

Антимікробна обробка текстильних матеріалів має подвійне призначення: захист організму людини від впливу патогенної мікрофлори при контакті з текстильними виробами та забезпечення збереження властивостей самої тканини шляхом інгібування дії мікроорганізмів. Актуальність даного напрямку обумовлена тим, що текстильні матеріали можуть слугувати сприятливим субстратом для розвитку бактерій, цвілевих грибів та дріжджів, життєдіяльність яких активізується за наявності вологи та оптимального температурного режиму. Як наслідок, текстильні вироби здатні виступати активними переносниками патогенних мікроорганізмів та вірусів.

Загалом, проблема забезпечення внутрішнього ринку текстильними матеріалами з антимікробними властивостями вітчизняного виробництва зумовлена відсутністю інноваційних технологій виробництва певного асортименту продукції. Створення науково обґрунтованого підходу до розробки полімерно-колоїдних композиційних складів з урахуванням призначення тканин могла б вирішити проблему надання стійких антимікробних властивостей текстильним матеріалам різного сировинного складу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перспективним напрямом функціоналізації текстильних матеріалів антимікробними властивостями є використання нанопрепаратів на основі металів та їх оксидів. Значний науковий інтерес зосереджений на дослідженнях наночастинок ZnO, що характеризуються як багатофункціональний, економічно вигідний та екологічно безпечний матеріал. До переваг застосування ZnO як антимікробного агенту належать: висока ефективність щодо антибіотикорезистентних штамів мікроорганізмів, низький рівень токсичності та термостабільність. Значна фотокаталітична активність ZnO посилює взаємодію наноматеріалу з бактеріальними клітинами. На відміну від наночастинок TiO_2, біоцидна активність ZnO проявляється також в умовах відсутності УФ-опромінення.

Незважаючи на достатньо вивчену біоцидну активність ZnO, молекулярні механізми її антимікробної дії залишаються предметом наукових дискусій. Серед основних гіпотез, що розглядаються в літературі [1], можна виділити такі процеси: по-перше, адгезія наночастинок до клітинних стінок із подальшим порушенням цілісності мембран; по-друге, генерація активних форм кисню (АФК) на поверхні наночастинок; по-третє, індукція оксидативного стресу за рахунок вивільнення іонів Zn^{2+}, що призводить до апоптозу клітин. Існує припущення, що антибактеріальна дія є результатом синергетичного ефекту від вказаних механізмів.

Надання антимікробних властивостей текстильним матеріалам може здійснюватися як на етапі перетворення волокноутворюючого полімеру на текстильне волокно, так і на стадії обробки готового волокна, полотна або виробу. Важливо відзначити, що метод функціоналізації на стадії синтезу полімерного матеріалу застосовується виключно для синтетичних текстильних матеріалів і є технологічно неприйнятним для природних волокон. Щодо целюлозних матеріалів, перспективним підходом є in situ синтез наночастинок металів безпосередньо на текстильному полотні [2, 3], проте практична реалізація цієї методики у промислових умовах пов'язана зі значними труднощами. Найбільш технологічно та економічно доцільним вважається метод застосування антибактеріальних агентів на етапі заключного опорядження тканин, оскільки він потребує зміни лише завершальної ланки виробничого процесу. Водночас, висока вартість імпортних нанопрепаратів обмежує масштабне впровадження цієї технології на вітчизняних текстильних підприємствах.

Ключовою проблемою технологій антимікробного опорядження текстилю є забезпечення стабільності функціональних властивостей модифікованих матеріалів. Ця проблема обумовлена недостатньою адгезією біоцидних агентів до текстильних волокон та їхньою міграцією з поверхні матеріалу під час експлуатації виробів.

Досягнення стійкої іммобілізації антимікробних реагентів на поверхні текстильних матеріалів можливе шляхом формування композитних полімерних покриттів, що забезпечить збереження експлуатаційних характеристик, набутих матеріалом в результаті модифікації біоцидними препаратами.

Необхідно відзначити, що істотним обмеженням застосування наночастинок у багатокомпонентних водних системах, якими є опоряджувальні композиції для обробки текстильних матеріалів, виступає схильність частинок до агрегації, зумовлена наявністю високої нескомпенсованої поверхневої енергії. Оскільки саме рівномірний розподіл нанонаповнювача визначає властивості полімерного нанокомпозиту та, як наслідок, якість функціонального покриття, основною вимогою є забезпечення контролю дисперсності наночастинок у полімерній матриці.

До основних характеристик дисперсій належать ступінь агломерації та величина поверхневого заряду. Агрегативна стійкість водних дисперсій наночастинок ZnO зумовлена переважно іонно-електростатичним фактором. При диспергуванні наночастинок у водних середовищах поверхнева іонізація разом із адсорбцією катіонів або аніонів призводить до виникнення поверхневого заряду та формування електричного потенціалу на межі поділу фаз «поверхня частинки – об'єм дисперсійного середовища». Відповідно до класичної теорії стійкості дисперсних систем, підвищення поверхневого заряду частинок сприяє посиленню електростатичної сили відштовхування, що запобігає процесу агломерації.

Отже, основною умовою створення функціональних опоряджувальних композицій із застосуванням наночастинок є рівномірний розподіл наповнювача у полімерній матриці, чому може сприяти як зменшення розміру частинок, так і модифікація їх поверхні спеціальними речовинами, що змінюють поверхневий заряд.

Поверхнева модифікація наночастинок є перспективним шляхом для успішного застосування наноматеріалів у полімерно-колоїдних опоряджувальних системах. У роботі [4] описано модифікацію наночастинок ZnO шляхом прищеплення на їх поверхню полістиролу для покращення диспергованості частинок та зменшення їхньої фотокаталітичної активності. У дослідженні [5] проведено модифікацію різних оксидних наночастинок за допомогою 3-метакрилоксипропілтриметоксисилану, в результаті чого сумісність модифікованих частинок з органічними матрицями була покращена. Автори роботи [6] покрили комерційні наночастинки ZnO амінопропілтриетоксисиланом за різних умов і виявили, що покриття є контрольованим, розмір кристалітів залишається майже

незмінним, процес щеплення не змінює спектри пропускання ZnO, а покриття з аміносілану може збільшити фотостабільність.

Таким чином, інтерес представляє дослідження впливу поверхневої модифікації наночастинок ZnO на взаємодію нанонаповнювача з матрицею полімерних зв'язуючих, що застосовуються у опоряджувальних композиціях для обробки текстильних матеріалів.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є проведення модифікації попередньо синтезованих наночастинок ZnO органосіланом і дослідження поверхневих властивостей модифікованого кристалічного наноматеріалу.

Викладення основного матеріалу дослідження

У технології заключної обробки текстилю важливе практичне значення мають водні дисперсії акрилових полімерів, що зумовлено оптимальним поєднанням експлуатаційних характеристик і відповідністю актуальним екологічним стандартам.

З метою забезпечення високої ефективності і пролонгованої дії функціонального нанокомпозитного покриття необхідно провести модифікацію поверхні нанонаповнювача.

Для дослідження використовували наночастинки ZnO, що синтезовані удосконаленим ресурсозберігаючим методом прямого осадження із водного розчину з використанням прекурсорів $Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ і NaOH [7].

У даній роботі як модифікуючий агент обрано біфункціональний органосілан – 3-гліцидоксипропілтриметоксисілан (GPTMS), структурна формула якого наведена на рис. 1.

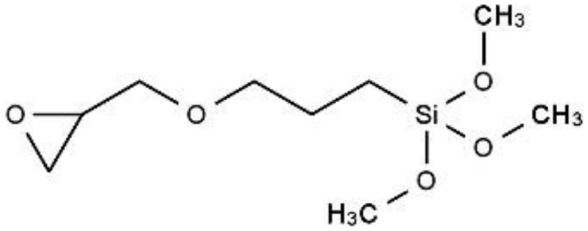


Рис. 1. Структурна формула 3-гліцидоксипропілтриметоксисілану (GPTMS)

Модифікація попередньо синтезованих наночастинок ZnO проводилась за наступною методикою. Досліджуваний органосілан GPTMS у кількості 1,5 ммоль в розрахунку на 1 г наночастинок гідролізували при pH 4 протягом 1 години при кімнатній температурі у розчині етанол/вода (50 : 50) з додаванням мінеральної кислоти (HCl 1H). До 1 г синтезованих наночастинок ZnO додавали 100 мл етанолу (96 %), перемішували 5 хв. на магнітній мішалці, а потім обробляли на ультразвуковому диспергаторі протягом 10 хв. Отриману суспензію переносили до трьохгорлої колби, куди по краплям додавали розчин сілану при постійному перемішуванні. Потім pH піднімали до 10 шляхом додавання необхідної кількості NaOH (1H). Реакція проходила при температурі 70 °C протягом 3 годин. Після модифікації наночастинки центрифугували, промивали етанолом і висушували при 60 °C.

Схема механізму модифікації поверхні наночастинок ZnO біфункціональним органосіланом GPTMS представлена на рис. 2.

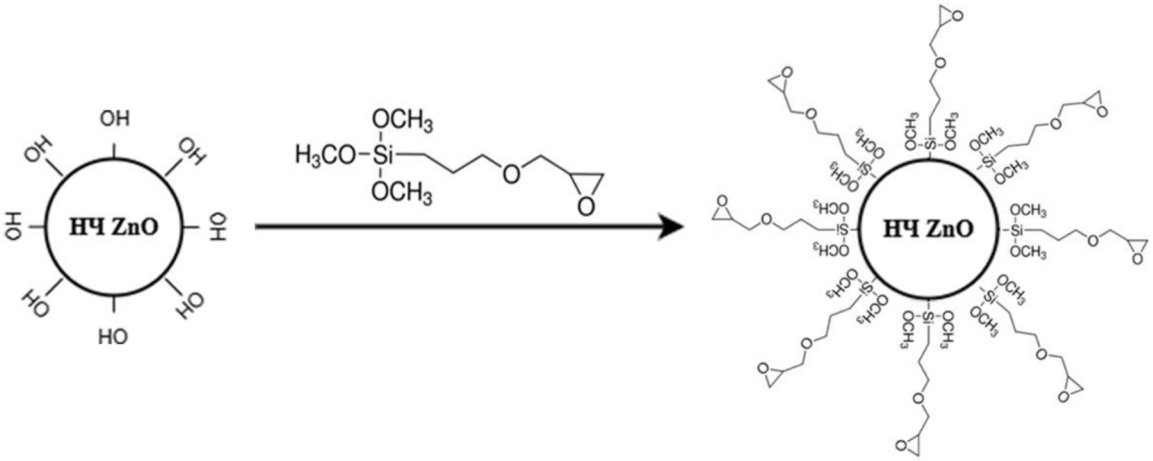
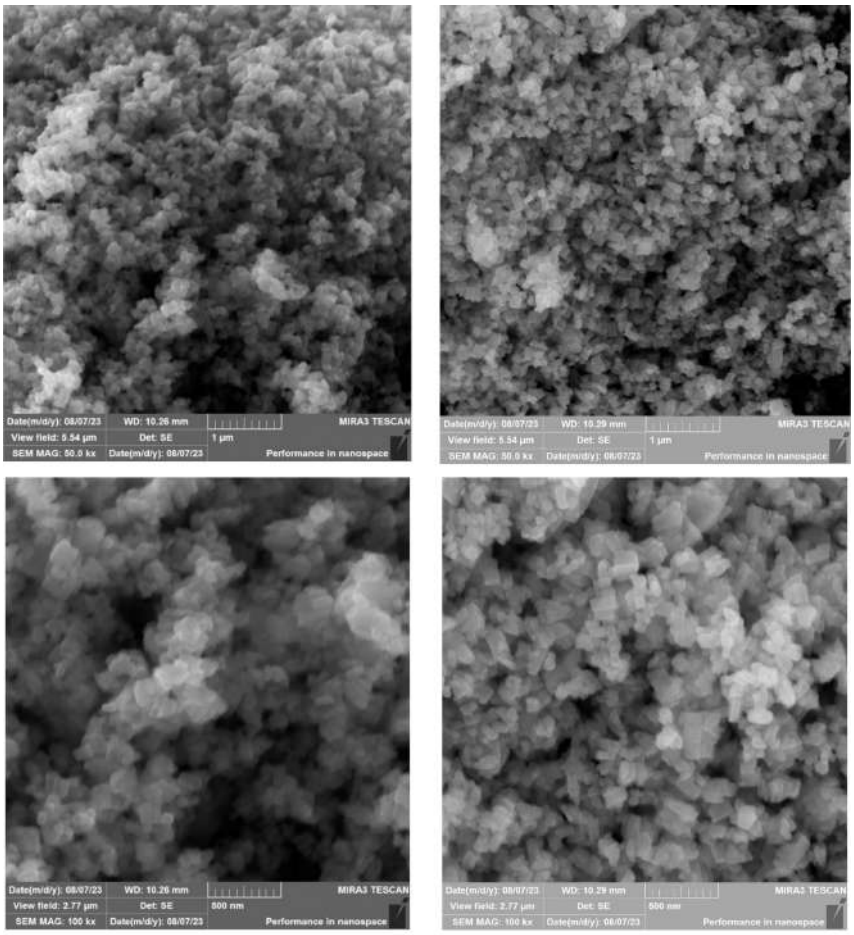


Рис. 2. Схематичний механізм поверхневої модифікації наночастинок ZnO органосіланом GPTMS

Дослідження морфологічної структури наночастинок ZnO і елементний аналіз синтезованих зразків здійснювали за допомогою електронної скануючої мікроскопії (СЕМ) на мікроскопі MIRA 3 FE-SEM (TESCAN, Чехія), оснащеному енергодисперсійним рентгенівським детектором (EDX) (Oxford Instruments, Великобританія). Зразок розміщувався на електропровідній непористій вуглецевій стрічці. Для усунення ефектів заряду зразок покривався тонким провідним шаром золота товщиною 3 нм. Для мікрофотографій СЕМ використовувалося збільшення 50 000*x* та 100 000*x*.

Морфологія поверхні досліджуваних модифікованих наночастинок ZnO порівнювалася з немодифікованим синтезованим зразком (рис. 3).



а) б)

Рис. 3. СЕМ-зображення зразків наночастинок ZnO при збільшенні 50 000*x* та 100 000*x*: а) немодифікований; б) модифікований

Отримані мікрофотографії (рис. 3, *а*, *б*) свідчать, що обидва зразки досліджуваних кристалічних матеріалів складаються з однорідних за розміром наночастинок переважно у формі коротких стрижнів, що є типовою морфологією частинок ZnO, синтезованих у гексагональній структурі вюрциту [7]. Після модифікації (рис. 3, *б*) спостерігається зниження ступеня агломерації наночастинок у порівнянні з вихідним зразком ZnO (рис. 3, *а*), що свідчить про зміну поверхневої енергії модифікованих частинок.

Результати дослідження елементного складу модифікованих наночастинок ZnO методом енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDX) представлені на рис. 4.

Аналіз отриманих даних на рис. 4 показує, що після модифікації наночастинок на спектрі EDX окрім сильних характерних піків Zn та O спостерігається наявність піку, що відноситься до Si. При цьому атомний відсоток вмісту цього елементу у досліджуваному модифікованому наноматеріалі становить 0,4 %. Поява характерного піку Si в наведеному спектрі EDX свідчить про наявність шару органосілану на поверхні наночастинок ZnO, що підтверджує успішну модифікацію.

Відомо, що при використанні епоксидів як зшиваючих агентів для композицій на основі акрилових полімерів, в реакції приймають участь як карбоксильні, так і гідроксильні функціональні групи полімерного зв'язуючого,

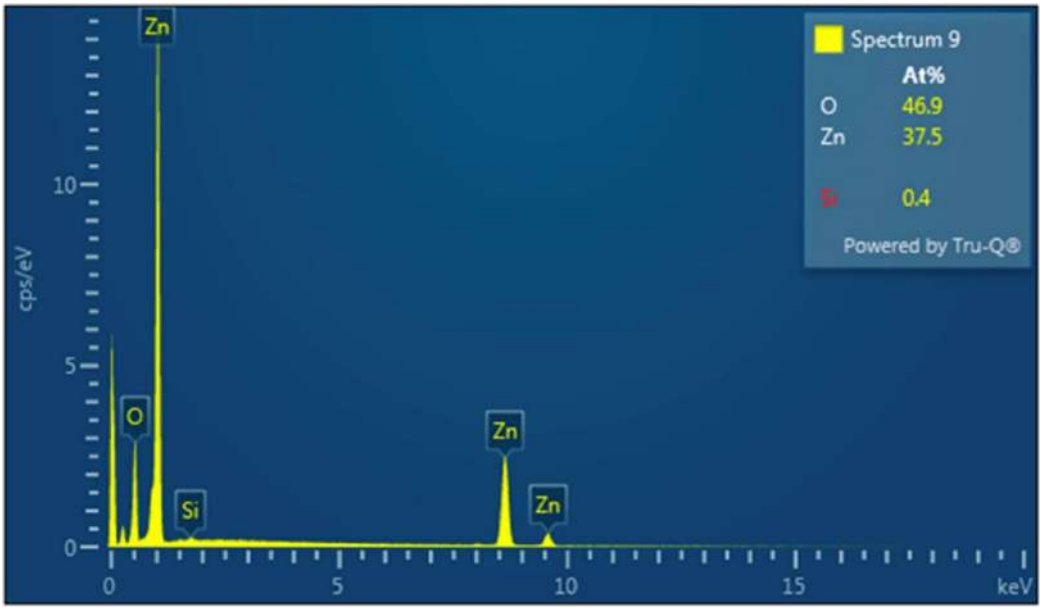


Рис. 4. Спектр EDX модифікованих наночастинок ZnO

що призводить до утворення ефірних зв'язків (рис. 5) [8, 9]. В результаті отримують безпечні і стійкі до фізико-хімічних впливів полімерні системи.

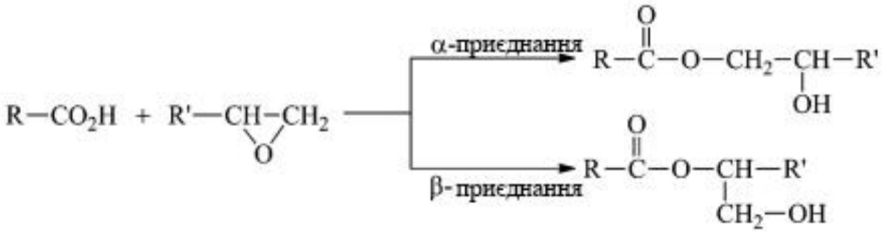


Рис. 5. Реакція між епоксидом та акриловим полімером

Таким чином, наявність епоксидної групи у структурі досліджуваного органосілану (рис. 1) дозволить хімічно зафіксувати модифіковані наночастинки ZnO у акриловій полімерній матриці.

У зв'язку з вищевикладеним, подальші дослідження будуть сконцентровані на оптимізації складу полімерно-колоїдних систем, що містять модифіковані наночастинки ZnO, з метою досягнення пролонгованої антимікробної ефективності композитних покриттів.

Висновки

У роботі проведено поверхневу модифікацію попередньо синтезованих наночастинок ZnO із застосуванням 3-гліцидоксипропілтриметоксисилану. В результаті дослідження морфологічної структури модифікованого кристалічного матеріалу методом скануючої електронної мікроскопії встановлено, що після модифікації обраним органосіланом спостерігається зменшення ступеня агломерації наночастинок, що дозволить покращити диспергованість нанонаповнювача у полімерно-колоїдних опоряджувальних системах. За результатами елементного аналізу модифікованих наночастинок ZnO у спектрі EDX виявлено наявність елемента Si з атомним відсотком 0,4 % у досліджуваному зразку, що підтверджує поверхневу модифікацію наночастинок органосіланом.

Список використаної літератури

1. Raha S., Ahmaruzzaman M. ZnO nanostructured materials and their potential applications: progress, challenges and perspectives. *Nanoscale Adv*., 2022, 4(8), 1868–1925. doi: https://doi.org/10.1039/d1na00880c

2. Hu R., Yang J., Yang P., Wu Z., Xiao H., Liu Y., Lu M. Fabrication of ZnO@Cotton fabric with anti-bacterial and radiation barrier properties using an economical and environmentally friendly method. *Cellulose*, 2020, 27, 2901–2911. doi: https://doi.org/10.1007/s10570-019-02965-1

3. Abramov O. V., Gedanken A., Koltypin Y., Perkas N., Perelshtein I., Joyce E., Mason T. J. Pilot scale sonochemical coating of nanoparticles onto textiles to produce biocidal fabrics. *Surface & Coatings Technology*, 2009, 204, 718–722. doi: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.09.030

4. Hong R. Y., Li J. H., Chen L. L., Liu D. Q., Li H. Z., Zheng Y., Ding J. Synthesis, surface modification and photocatalytic property of ZnO nanoparticles. *Powder Technology*, 2009, 189, 426–432. doi: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.07.004

5. Posthumus W., Magusin P. C. M. M., Brokken-Zijp J. C. M., Tinnemans A. H. A., van der Linde R. Surface modification of oxidic nanoparticles using 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane. *J. Colloid Interface Sci*., 2004, 269, 109–116. doi: https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.07.008

6. Grasset F., Saito N., Li D., Park D., Sakaguchi I., Ohashi N., Haneda H., Roisnel T., Mornet S., Duguet E. Surface modification of zinc oxide nanoparticles by aminopropyltriethoxysilane. *J. Alloy. Compd*., 2003, 360, 298–311. doi: https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00371-2

7. Asaulyuk T. S. Synthesis and structural characterization of ZnO nanoparticles / T. S. Asaulyuk, Yu. G. Saribyekova, O. Ya. Semeshko, I. M. Kulish // *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. – 2022. – № 4(311). – P. 35–41. doi: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-311-4-35-41

8. Слепчук И. Влияние бесформальдегидных препаратов на процесс отверждения акриловых полимеров, используемых в композиционных отделочных составах / И. Слепчук, И. Н. Кулиш, Г. С. Сарибеков // *Вестник Херсонского национального технического университета. Технические науки*. – 2012. – № 2(45). – С. 180–183.

9. Cherdoud-Chihani A., Mouzali M., Abadie M. Study of crosslinking acid copolymer/DGEBA systems by FTIR. *J. Appl. Polym. Sci*., 2003, 87, 2033–2051. doi: https://doi.org/10.1002/app.11389

References

1. Raha S., Ahmaruzzaman M. (2022) ZnO nanostructured materials and their potential applications: progress, challenges and perspectives. *Nanoscale Adv*., 4(8), 1868–1925. doi: https://doi.org/10.1039/d1na00880c

2. Hu R., Yang J., Yang P., Wu Z., Xiao H., Liu Y., Lu M. (2020) Fabrication of ZnO@Cotton fabric with anti-bacterial and radiation barrier properties using an economical and environmentally friendly method. *Cellulose*, 27, 2901–2911. doi: https://doi.org/10.1007/s10570-019-02965-1

3. Abramov O. V., Gedanken A., Koltypin Y., Perkas N., Perelshtein I., Joyce E., Mason T. J. (2009) Pilot scale sonochemical coating of nanoparticles onto textiles to produce biocidal fabrics. *Surface & Coatings Technology*, 204, 718–722. doi: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2009.09.030

4. Hong R. Y., Li J. H., Chen L. L., Liu D. Q., Li H. Z., Zheng Y., Ding J. (2009) Synthesis, surface modification and photocatalytic property of ZnO nanoparticles. *Powder Technology*, 189, 426–432. doi: https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.07.004

5. Posthumus W., Magusin P. C. M. M., Brokken-Zijp J. C. M., Tinnemans A. H. A., Linde van der R. (2004) Surface modification of oxidic nanoparticles using 3-methacryloxypropyltrimethoxysilane. *J. Colloid Interface Sci*., 269, 109–116. doi: https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.07.008

6. Grasset F., Saito N., Li D., Park D., Sakaguchi I., Ohashi N., Haneda H., Roisnel T., Mornet S., Duguet E. (2003) Surface modification of zinc oxide nanoparticles by aminopropyltriethoxysilane. *J. Alloy. Compd*., 360, 298–311. doi: https://doi.org/10.1016/S0925-8388(03)00371-2

7. Asaulyuk T. S., Saribyekova Yu. G., Semeshko O. Ya., Kulish I. M. (2022) Synthesis and structural characterization of ZnO nanoparticles. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 4(311), 35-41. doi: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-311-4-35-41

8. Slepchuk I., Kulish I. N., Saribekov G. S. (2012) Vliyanie besformaldegidnyih preparatov na protsess otverzhdeniya akrilovyih polimerov, ispolzuemyih v kompozitsionnyih otdelochnyih sostavah. [The influence of formaldehyde-free preparations on the curing process of acrylic polymers used in composite finishing compounds]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, 2(45), 180–183.

9. Cherdoud-Chihani A., Mouzali M., Abadie M. (2003) Study of crosslinking acid copolymer/DGEBA systems by FTIR. *J. Appl. Polym. Sci*., 87, 2033–2051. doi: https://doi.org/10.1002/app.11389

Дата першого надходження рукопису до видання: 19.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 16.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 677.076 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.41

О. А. ГІБЕЛІНДА
аспірантка кафедри товарознавства, стандартизації та сертифікації
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0008-5877-0653

Ю. Г. САРІБЄКОВА
доктор технічних наук, професор,
головний науковий співробітник науково-дослідного сектору
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-6430-6509

ВПЛИВ СУЧАСНОГО ЗАВЕРШАЛЬНОГО ОБРОБЛЕННЯ НА ТЕХНОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИКОТАЖНИХ ПОЛОТЕН

Проблема конкурентоспроможності швейних виробів з трикотажних полотен, вироблених вітчизняними підприємствами, являє собою складний комплекс взаємопов'язаних організаційних, інформаційно-технологічних, технічних і економічних завдань. Вирішення цих завдань є основоположною передумовою зниження собівартості продукції, підвищення її якості та можливості підвищення конкурентної присутності виробництва на ринку товарів народного споживання. З врахуванням подальшого росту потреб до якості швейних виробів питання вдосконалення цілого ряду операцій і процесів, впровадження нових технологій та забезпечення їх технічними засобами здобувають особливу значущість. Ефективне вирішення цих задач повинно супроводжуватись обумовленим вибором і прогнозуванням асортименту, технологічних режимів та параметрів, основ проєктування та розрахунку процесів. У даній роботі розглянуто вплив сучасного завершального оброблення на технологічні характеристики трикотажних полотен у процесі швейного виробництва шляхом використання нанорозмірних органосилікoнових пом'якшувачів та оцінка можливості їх покращення. Теоретичні та експериментальні дослідження роботи базуються на основних принципах текстильного матеріалознавства. Під час експериментальних досліджень використовувалися стандартні лабораторні методи, які відтворюють процес пом'якшувальної обробки трикотажних полотен. В якості об'єкта дослідження прийнято технологію завершального оброблення текстильних матеріалів. В якості предмета дослідження обрані зразки трикотажних полотен, які виготовлені переплетенням інтерлок. Технологічний процес обробки було виконано на промисловому швейному обладнанні Bruce B500 4-х нитковому оверлоку. В ході проведення дослідження визначено, що застосування інноваційного завершального оброблення, зокрема нанорозмірних органосилікoнових пом'якшувачів поліпшує технологічні характеристики трикотажних полотен та позитивно впливає на стабільність лінійних розмірів трикотажного полотна. Це свідчить про те, що завершальна обробка трикотажних полотен нанорозмірними органосилікoновими пом'якшувачами може розглядатись як спосіб зниження технологічної трудомісткості процесу шиття. Наукова новизна роботи полягає у підвищенні ефективності технологічної переробки трикотажних полотен на швейному обладнанні шляхом використання завершального оброблення зразків полотен нанорозмірними органосилікoновими пом'якшувачами. Результати дослідження можуть бути використані на швейних підприємствах при конструюванні деталей та виготовленні трикотажного одягу, а також при розробці нових матеріалів з поліпшеними властивостями.

Ключові слова: *завершальне оброблення, технологічні властивості, деформаційні властивості, стабільність лінійних розмірів, продуктивність швейного обладнання.*

O. A. HIBELINDA
Postgraduate Student at the Department of Commodity Science,
Standardization, and Certification
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0008-5877-0653

YU. G. SARIBYEKOVA
Doctor of Technical Science, Professor,
Chief Researcher of Research Sector
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-6430-6509

© Гібелінда О. А., Сарібєкова Ю. Г., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

THE INFLUENCE OF MODERN FINISHING ON THE TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF KNITTED FABRICS

The problem of competitiveness of knitted garments produced by domestic enterprises is a complex set of interrelated organizational, information and technological, technical and economic tasks. Solving these tasks is a fundamental prerequisite for reducing the cost of production, improving its quality and increasing the competitive presence of production in the consumer goods market. Taking into account the further growth of requirements for the quality of ready-made garments, the issues of improving a number of operations and processes, introducing new technologies and providing them with technical means are gaining particular importance. Efficient solution ofthese tasks should be accompanied by a determined choice and forecasting of the assortment, technological modes and parameters, the basics of design and calculation of processes. This work considers to determine the impact of modem finishing on the technological characteristics of knitted fabrics in the process of sewing production by using nano-sized organosilicon softeners and to assess the possibility of their improvement. Theoretical and experimental studies of the work are based on the basic principles of textile materials science. During the experimental studies, standard laboratory methods were used that reproduce the process of softening treatment of knitted fabrics. The technology of finishing of textile materials was taken as the object of the study. As the subject of the study, samples of knitted fabrics made by interlock weaving were chosen. The technological process ofprocessing was performed on industrial sewing equipment Bruce B500 4+hread overlock. During the study, it was determined that the use of innovative finishing, in particular nano-sized organosilicon softeners, improves the technological characteristics of knitted fabrics and positively affects the stability of the linear dimensions of the knitted fabric. This indicates that the final treatment of knitted fabrics with nano-sized organosilicon softeners can be considered as a way to reduce the technological complexity of the sewing process. The scientific novelty of the work lies in increasing the efficiency of technological processing of knitted fabrics on sewing equipment by using the final treatment of fabric samples with nano-sized organosilicon softeners. The results of the study can be used at sewing enterprises in the design of parts and the manufacture of knitted clothing, as well as in the development of new materials with improved properties

Key words: *of finishing processing, technological properties, deformation properties, stability of linear dimensions, productivity of a sewing equipment.*

Постановка проблеми

Трикотажна промисловість займає важливе місце в легкій промисловості України. Вона виробляє різноманітний одяг: від білизни до спортивних костюмів і верхнього одягу. Також виготовляються вироби для технічного та спеціального використання. Споживачі обирають трикотаж через численні переваги : він комфортний, практично не зминається, вироби з трикотажних полотен завжди є актуальними та незамінними у повсякденному житті.

Ключовим параметром трикотажних полотен виступають деформаційно-розтягувальні характеристики, зокрема їх пружні властивості. Саме вони визначають не лише комплекс експлуатаційно-споживчих властивостей трикотажних виробів, а й доцільність використання трикотажу для певних видів продукції за функціональним призначенням. Водночас навіть незначні зміни полотен зумовлюють специфічні особливості технологічних процесів виготовлення виробів.

Одним із ключових показників якості текстильних матеріалів вважається стабільність їх лінійних розмірів. Трикотажні полотна характеризуються значно більшою розтяжністю порівняно з тканинами та відзначаються рухливою структурою, яка реагує навіть на незначні механічні навантаження. Матеріали з високим ступенем розтягування при малих зусиллях ускладнюють процес розкрою та пошиття, оскільки схильні до перекосів, розтягування у швах і деформацій. Тому, під час конструювання швейних виробів необхідно враховувати припуски, для попередження можливої усадки матеріалу, як у готовому виробі, так і під час волого-теплової обробки в процесі шиття [1].

Також суттєвим недоліком трикотажних полотен є їх схильність до прорубування голкою, що призводить до спуску петель і відповідно, до зниження якості готових виробів. Рівень розтяжності та ймовірність прорубування зумовлюється низкою факторів, серед яких визначними є волокнистий склад, структурні особливості, показники щільності полотна, а також характер завершального оброблення.

Тому, виходячи з цього, актуально оцінити пом’якшувальну дію трикотажних полотен з використанням інноваційного завершального оброблення, як фактору вдосконалення показників технологічних властивостей трикотажних полотен при виготовленні швейних виробів.

Під час обробки таким препаратом текстильний матеріал набуває м’якості, еластичності та стійкості лінійних розмірів до мокрих обробок. Характерною особливістю застосування органосилiконових пом’якшувачів для обробки є комплексний характер їх дії, коли в результаті одноразової обробки текстильний матеріал одночасно набуває декількох нових необхідних властивостей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз світових показників у виробництві текстильних виробів за видами та прогноз розвитку до 2025 року засвідчують стійку динаміку зростання загального обсягу виробництва волокнистих матеріалів. Вирішальним фактором зростання ринку трикотажних виробів є розвиток швейної промисловості, яка демонструє стабільне

зростання виробництва та постійний попит на трикотажний одяг у зв'язку зі зміною пріоритетів споживачів на користь зручності, функціональності та доступності продукції [1].

Окрім легкої промисловості, прогноз до кінця 2033 року вказує на розширення сфери застосування трикотажних матеріалів у суміжних галузях, зокрема в автомобілебудуванні, будівництві, виробничому секторі та медицині.

У виробництві захисного одягу легкі трикотажні текстильні вироби стають популярними в усьому світі. Міцні, стійкі до розривів та губчасті матеріали використовуються в одно- або двошаровому виконанні в численних захисних виробах.

Зростає попит на зручні, м'які та стійкі до зморшок тканини у джинсовому одязі, що, як очікується, ще більше підвищить попит на трикотажні полотна. Зростаюча важливість синтетичних волокон у швейній та будівельній промисловості, за прогнозами, стимулюватиме можливості зростання у наступне десятиліття. В останні роки спостерігається значне збільшення використання волокна в будівельному секторі. Волокно використовується як геотекстиль у різних сферах застосування [2–4]. Таким чином, глобальні економічні та технологічні фактори створюють умови для подальшого зміцнення позицій трикотажних виробів у структурі світового текстильного виробництва.

За даними 2024 р. Державної служби статистики України, спостерігається позитивна тенденція зростання промислових показників у вітчизняному секторі текстильного виробництва. За звітний період 2024 року обсяг реалізованої продукції на 11 % більше за аналогічний період 2023 року [5, 6].

Підвищення технічного і технологічного рівня виробництва є одним з основних завдань вітчизняної економіки для забезпечення її конкурентоспроможності та ефективної діяльності в ринкових умовах [7].

Тому, доцільним є визначити конкретні проблеми, які негативно впливають на якість трикотажних виробів, а також комплексно дослідити фактори, що формують технологічні характеристики трикотажних полотен.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи було визначення впливу сучасного завершального оброблення на технологічні характеристики трикотажних полотен у процесі швейного виробництва шляхом використання нанорозмірних органосиліконових пом'якшувачів та оцінка можливості їх покращення.

Викладення основного матеріалу дослідження

Трикотаж – це матеріал, отриманий в результаті переплетення ниток або пряжі. Він відомий своєю м'якістю, еластичністю та універсальністю, що робить його популярним вибором для виробництва одягу, декорування інтер'єрів та аксесуарів.

Не зважаючи на зручність та функціональність матеріалу, його технологічна обробка має певні особливості, пов'язані з властивостями матеріалу. Деформація багатьох видів трикотажу, на відміну від тканин, при невеликому зусиллі розтягування значно ускладнює підготовчо-розкрійні процеси, пошиття, а також ускладнює надання виробам стабільних форм і розмірів.

На сучасному етапі для надання трикотажним полотнам специфічних властивостей, застосовують різноманітні текстильно- допоміжні речовини, які по-різному взаємодіють із текстильним субстратом, змінюючи її експлуатаційні та технологічні властивості. Одним з перспективних напрямків поліпшення пошивних властивостей трикотажних полотен, переважно виготовлених з целюлозних волокон та їх сумішей із синтетичними компонентами, є застосування нанорозмірних органосиліконових пом'якшувачів. Їх вплив на технологічні характеристики полотен в поєднанні з інноваційними методами завершальної обробки дозволяє вдосконалити властивості трикотажу та підвищити якість готової продукції [1].

В якості предмета дослідження обрано зразки бавовняного трикотажного полотна виготовленого переплетенням «інтерлок».

Досліджувані зразки підлягали обробці поліетиленового помякшувача Колософт П(ДП «Хімтекс»).

Колософт П – поліетиленовий пом'якшувач, що застосовується до всіх типів волокон і надає текстильному матеріалу ефект м'якого дотику та ковзання, за хімічним складом препарат є сумішшю поліетиленових емульсій, за іонним характером – неіонний, pH – 5–7(10 %), за зовнішнім виглядом – рідина кремового кольору, повністю розчиняється воді [8].

Завершальне оброблення зразків трикотажного полотна проводилося за стандартною технологією методами плюсування та вибирання:

– обробка за методом вибирання проводилося в лабораторних умовах з концентраціями 2 і 4 % препарату від маси оброблюваного матеріалу при температурі 40 °С протягом 15–20 хв;

– обробка за методом плюсування проводилося в лабораторних умовах шляхом просочення зразків трикотажних полотен розчинами пом'якшувачів при температурі 40 °С з концентраціями 20 і 40 г/л.

Після обробок різними методами досліджувані зразки підлягали однаковим технічним операціям: відтисканню між валами лабораторної плюсовки до досягнення остаточного вмісту вологи 90 % та сушці в термостаті.

Після висихання отриманих зразків, для правдивого результату, їх тестували в однакових умовах разом з необробленими зразками.

Технологічний процес пошиття було виконано на промисловому швейному обладнанні Bruce B500 4-х нитковому оверлоку, для проведення дослідження використані поліефірні швейні нитки та голка DCx27 14/90 B27 призначена для трикотажних полотен. Як свідчать отримані данні, в результаті з'єднання деталей досліджуваних зразків полотен зшивально-обметувальною строчкою (рис. 1) ковзкість полотна під лапкою підвищується, також сприяє легкому рухові голки, усуваючи тертя між волокном та металом, що позитивно впливає на якість строчки та зменшує прорубуваність матеріалу.



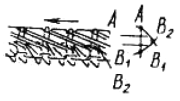
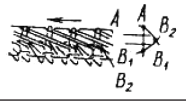
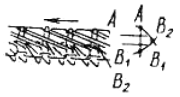
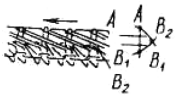
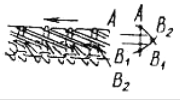
а) б)

Рис. 1. Вплив властивостей трикотажного полотна на пошивний процес: а) необроблений зразок; б) зразок, оброблений препаратом Колософтом П методом вибирання, 2 %

Зміна лінійних розмірів досліджуваних зразків трикотажних полотен є одним з головних показників, що характеризує його якість. Результати дослідження зміни лінійних розмірів та впливу властивостей трикотажного полотна на пошивний процес продемонстровано в табл. 1.

Таблиця 1

Вплив властивостей трикотажного полотна на пошивний процес

Зразок	Тип з'єднання	Схема шва	Зміна лінійних розмірів, см	Пошивні властивості
Необроблений	Зшивально-обметувальний чотирьох нитковий ланцюгового переплетення		20 × 10 після прокладання строчки: 20,5 × 10,8	Вздовж петельних стовпчиків є незначне розтягнення, значне розтягнення по петельному рядку, спостерігається видима прорубаємість
Метод вибирання, 2 %	Зшивально-обметувальний чотирьох нитковий ланцюгового переплетення		20 × 10 після прокладання строчки: 20,2 × 10,3	Розтягнення присутнє як по петельним стовпчикам, так і по петельному ряду
Метод вибирання, 4 %	Зшивально-обметувальний чотирьох нитковий ланцюгового переплетення		20 × 10 після прокладання строчки: 20,0 × 10,3	Підвищена ковзкість під лапкою, збільшена деформація вздовж петельного ряду
Метод плюсування, 20 г/л	Зшивально-обметувальний отирьох нитковий ланцюгового переплетення		20 × 10 після прокладання строчки: 20,2 × 10,5	Підвищена ковзкість під лапкою, зменшена прорубаємість, проколи від голки повністю видаляються парою
Метод плюсування, 20 г/л	Зшивально-обметувальний чотирьох нитковий ланцюгового переплетення		20 × 10 після прокладання строчки: 20,3 × 10,5	Підвищена ковзкість під лапкою, незначне розтягнення як по петельним стовпчикам, так і по петельному ряду

Висновки

Таким чином, узагальнюючи результати дослідження, можна зробити висновок, що застосування інноваційного завершального оброблення з використанням органосиліконових пом'якшувачів значно поліпшує показники технологічних властивостей трикотажних полотен. Встановлено, що завершальна обробка трикотажних полотен з використанням препарату Колософт П дозволяє вдосконалити його пошивні властивості та має потенціал для поліпшення якості готової продукції. Використання препарату Колософт П для трикотажних полотен запобігає тертю між волокнами та металом, забезпечуючи легке прокладання строчки, сприяє легкому руху голки, а також запобігає її нагріванню. Завдяки цьому препарату, під час швидкої строчки голка утворює невеликі отвори в матеріалі, уникаючи прорубування. Не впливає на гідрофільність волокон текстильних матеріалів.

Список використаної літератури

1. Сумська О. П., Фещук Ю. А., Гібелінда О. А.,. Панченко Н. В Поліпшення технологічних характеристик трикотажного полотна шляхом застосування нанорозмірних органосиліконових пом'якшувачів. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки : 1813–6796. 2020. № 3 (146). С. 112–128. DOI:http://dx.doi.org/10.30857/1813-6796.2020.3.10
2. Knitted Fabric Market Size, Share & Trends Report. Knitted Fabric Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Weft-knit, Warp-knit), By Application (Technical, Household), By Region, And Segment Forecasts, 2019–2025. URL:: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/knitted-fabric-market (дата звернення: 21.08.2025).
3. Knitted Fabric Market Analysis By Weft-knitted and Warp-knitted for Clothing, Civil engineering, Aerospace, Automotive, Construction, Medical and Agricultural from 2023 to 2033. URL:: https://www.factmr.com/report/2865/knitted-fabrics-market (дата звернення: 21.08.2025).
4. DNFI World Natural Fibre Update July 2025. URL: https://dnfi.org/dnfi-world-natural-fibre-update-juli-2025 (дата звернення: 21.08.2025).
5. Секторальний аналіз:легка промисловість. URL: http://www.ier.com.ua/files/Projects/2024/CEP/Sectoral_report_light_industry.pdf (дата звернення: 21.08.2025).
6. Аналітично-статистичні матеріали галузі легкої промисловості.: URL:https://ukrlegprom.org/ua/analytics (дата звернення: 21.08.2025).
7. Скрипник Н. Є., Б. І.Захарченко ФОРМУВАННЯ КОНКУРЕНТНОГО ПРОФІЛЮ ВІТЧИЗНЯНИХ КОМПАНІЙ У ГЛОБАЛЬНОМУ БІЗНЕС-СЕРЕДОВИЩІ. Galician economic journal. 2023. Т. 83. №. 4. doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2023.04.171
8. Гібелінда, О., & Сарібєкова, Ю. Визначення впливу завершальної обробки трикотажних полотен на їх пошивні властивостіі. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 2025. № 351(3.1). С. 434–437. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-53

References

1. Sumska O. P., Feshchuk Yu. A., Hibelinda O. A.,. Panchenko N. V Polipshennia tekhnolohichnykh kharakterystyk trykotazhnoho polotna shliakhom zastosuvannia nanorozmirnykh orhanosylikonovykh pomiakshuvachiv. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Seriia Tekhnichni nauky : 1813–6796*. 2020. № 3 (146). S. 112–128. DOI:http://dx.doi.org/10.30857/1813-6796.2020.3.10
2. Knitted Fabric Market Size, Share & Trends Report. Knitted Fabric Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Weft-knit, Warp-knit), By Application (Technical, Household), By Region, And Segment Forecasts, 2019–2025. URL:: https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/knitted-fabric-market (data zvernennia: 21.08.2025).
3. Knitted Fabric Market Analysis By Weft-knitted and Warp-knitted for Clothing, Civil engineering, Aerospace, Automotive, Construction, Medical and Agricultural from 2023 to 2033. URL: https://www.factmr.com/report/2865/knitted-fabrics-market (data zvernennia: 21.08.2025).
4. DNFI World Natural Fibre Update July 2025. URL: https://dnfi.org/dnfi-world-natural-fibre-update-juli-2025 (data zvernennia: 21.08.2025).
5. Sektoralnyi analiz:lehka promyslovist. URL: http://www.ier.com.ua/files/Projects/2024/CEP/Sectoral_report_light_industry.pdf (data zvernennia: 21.08.2025).
6. Analitychno-statystychni materialy haluzi lehkoi promyslovosti.: URL:https://ukrlegprom.org/ua/analytics (data zvernennia: 21.08.2025).
7. Skrypnyk N.Ie., B.I.Zakharchenko FORMUVANNIa KONKURENTNOHO PROFILIu VITChYZNIaNYKh KOMPANII U HLOBALNOMU BIZNES-SEREDOVYShchI. *Galician economic journal*. 2023. T. 83. №. 4. doi.org/10.33108/ galicianvisnyk_tntu2023.04.171
8. Hibelinda, O., & Saribiekova, Yu. Vyznachennia vplyvu zavershalnoi obrobky trykotazhnykh poloten na yikh poshyvni vlastyvostii. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 2025. № 351(3.1). S. 434–437. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-53

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 20.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 339.543:656.053.5 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.42

Є. О. КАЛІНСЬКИЙ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри товарознавства, стандартизації та сертифікації
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-2605-8759

О. ВОРОНКО
аспірант кафедри товарознавства, стандартизації та сертифікації
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0008-0819-511X

УДОСКОНАЛЕННЯ АКУСТИЧНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ ЛУБОВОКНИСТОЇ СИРОВИНИ

Стаття присвячена актуальній проблемі розробки ефективних методів контролю якості лубоволокнистої сировини, зокрема конопляного волокна, яке набуває все більшого значення в текстильній промисловості та виробництві композитних матеріалів в умовах розвитку екологічно орієнтованих технологій, реалізації Стратегії розвитку АПК України до 2030 року та європейського Green Deal, що сприяє розширенню використання лубоволокнистих культур як пріоритетного напрямку сталого розвитку сільського господарства.

Підкреслюється, що існуючі методи контролю якості конопляного волокна мають суттєві недоліки: традиційні органолептичні методи є суб'єктивними та недостатньо точними для сучасних вимог виробництва, механічні методи – руйнівними та трудомісткими (до 3–8 годин на один зразок), а низькочастотні акустичні методи (500–2000 Гц) неефективні для неоднорідних конопляних волокон через їх структурні особливості та значну варіабельність діаметра (15–50 мкм).

У статті детально аналізуються фізичні принципи запропонованого ультразвукового методу, що базуються на явищі дифракції акустичних хвиль на волокнистих структурах, які розглядаються як багатошарова дифракційна решітка. Теоретично обґрунтовано доцільність використання частотного діапазону 1–5 МГц, що забезпечує оптимальні умови дифракції ($\lambda \approx 0{,}11$ мм при $f = 3$ МГц) порівняно з існуючими низькочастотними методами ($\lambda = 0{,}17–0{,}69$ м при 500–2000 Гц).

Розроблено математичну модель з коефіцієнтом неоднорідності $Кн = 1 + \sigma d/dcp$, що враховує варіабельність діаметра конопляних волокон і дозволило підвищити точність визначення параметрів волокна з ±15 % до ±2,5 %. Експериментально підтверджено високу кореляцію ультразвукових показників з традиційними характеристиками якості: лінійна густина ($r = 0{,}92$), розривна прочність ($r = 0{,}89$), ступінь зрілості ($r = 0{,}94$).

Розроблена експериментальна установка на базі цифрового осцилографа OWON SDS1102 забезпечує відтворюваність результатів з коефіцієнтом варіації $CV = 2{,}1$ %. Запропонований метод забезпечує скорочення часу аналізу до 2 хвилин, неруйнівний характер контролю та можливість одночасного визначення 5–6 параметрів якості, що робить його перспективним для впровадження на підприємствах текстильної промисловості.

Ключові слова: *конопляне волокно, лубоволокниста сировина, неруйнівний контроль, експрес-аналіз, дифракція, акустичні методи, текстильна промисловість.*

E. O. KALINSKY
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Commodity Research, Standardization and Certification
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-2605-8759

O. VORONKO
Postgraduate Student at the Department of Commodity Research, Standardization and Certification
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0008-0819-511X

© Калінський Є. О., Воронко О., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

IMPROVEMENT OF ACOUSTIC METHOD FOR DETERMINING THE QUALITY OF BAST FIBER RAW MATERIALS

The article is devoted to the actual problem of developing effective methods for quality control of bast fiber raw materials, particularly hemp fiber, which is gaining increasing importance in the textile industry and composite materials production under the conditions of environmentally oriented technologies development, implementation of the Strategy for Agricultural Development of Ukraine until 2030, and the European Green Deal, which promotes the expansion of bast fiber crops use as a priority direction for sustainable agricultural development.

It is emphasized that existing methods for hemp fiber quality control have significant disadvantages: traditional organoleptic methods are subjective and insufficiently accurate for modern production requirements, mechanical methods are destructive and labor-intensive (up to 3–8 hours per sample), while low-frequency acoustic methods (500–2000 Hz) are ineffective for heterogeneous hemp fibers due to their structural features and significant diameter variability (15–50 μm).

The article provides detailed analysis of the physical principles of the proposed ultrasonic method, based on the phenomenon of acoustic wave diffraction on fibrous structures, which are considered as a multilayer diffraction grating. The feasibility of using the frequency range of 1-5 MHz is theoretically substantiated, which ensures optimal diffraction conditions ($\lambda \approx 0.11$ mm at $f = 3$ MHz) compared to existing low-frequency methods ($\lambda = 0.17–0.69$ m at 500–2000 Hz).

A mathematical model with heterogeneity coefficient $K_н = 1 + \sigma d/dcp$ has been developed, which takes into account the variability of hemp fiber diameter and allowed to improve the accuracy of fiber parameter determination from ±15 % to ±2.5 %. High correlation of ultrasonic indicators with traditional quality characteristics has been experimentally confirmed: linear density ($r = 0.92$), breaking strength ($r = 0.89$), maturity degree ($r = 0.94$).

The developed experimental setup based on the OWON SDS1102 digital oscilloscope ensures reproducibility of results with a coefficient of variation CV = 2.1 %. The proposed method provides reduction of analysis time to 2 minutes, non-destructive control character and the possibility of simultaneous determination of 5–6 quality parameters, making it promising for implementation in textile industry enterprises.

Key words: *hemp fiber, bast fiber raw materials, non-destructive control, express analysis, diffraction, acoustic methods, textile industry.*

Постановка проблеми

В умовах активного розвитку екологічно орієнтованих технологій та зростання попиту на натуральні матеріали, лубоволокниста сировина, зокрема конопляне волокно, набуває все більшого значення в текстильній промисловості та виробництві композитних матеріалів. Згідно зі Стратегією розвитку АПК України до 2030 року та європейським Green Deal, розширення використання лубоволокнистих культур є пріоритетним напрямком сталого розвитку сільського господарства.

Однак існуючі методи контролю якості лубоволокнистої сировини, зокрема конопляного волокна, характеризуються рядом суттєвих недоліків. Традиційні органолептичні методи є суб'єктивними та недостатньо точними для сучасних вимог виробництва. Механічні методи контролю, хоча і забезпечують більшу об'єктивність, є руйнівними, трудомісткими та вимагають значних часових витрат (до 3–8 годин на один зразок).

Особливу складність становить контроль якості конопляного волокна, яке характеризується значною неоднорідністю структури порівняно з іншими текстильними волокнами. Діаметр елементарних конопляних волокон може коливатися в межах від 15 до 50 мкм, стандартне відхилення діаметра досягає 0,1–0,5 мм, що створює додаткові виклики для точного контролю якості. Це обумовлює необхідність розробки нових, більш ефективних методів експрес-контролю якості лубоволокнистої сировини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання контролю якості лубоволокнистої сировини досліджували як вітчизняні, так і зарубіжні науковці, проте більшість робіт зосереджена на традиційних методах або адаптована для льняного волокна.

Серед акустичних методів контролю найбільш значущими є дослідження Кузьміної Т. О., Толмачова В. С., Єдиновича М. Б. та співавторів [1], які розробили метод аналізування лляного волокна на основі його акустичних властивостей у діапазоні частот 500–2000 Гц. Автори встановили кореляційний зв'язок між звукопоглинальними властивостями лляного волокна та його фізико-механічними показниками на рівні статистичної значущості 0,05. Однак цей метод має суттєві обмеження при застосуванні для конопляного волокна через його структурні особливості та більшу неоднорідність.

Толмачов В. С. [2] у дисертаційному дослідженні розглядав можливості сенсорного аналізу для контролю якості лляного волокна, але запропоновані підходи характеризуються високою суб'єктивністю та недостатньою точністю для промислового застосування.

У сфері ультразвукових досліджень натуральних волокон варто відзначити роботу Sullivan Renouard та співавторів [3], які вивчали характеристики впливу ультразвуку на льон, коноплю та кокосове волокно. Проте їх дослідження фокусувалося на технологічній обробці волокон, а не на методах контролю якості, що залишає прогалину в цій сфері.

Shahzad A. [4] та Pickering K. L. зі співавторами [5] досліджували властивості конопляного волокна та його композитів, підкресливши основний недолік природних волокон – мінливість їхніх властивостей та високу неоднорідність структури. Liu M. та співавтори [6] характеризували конопляні волокна з різних частин стебла, встановивши значну варіабельність їх параметрів.

Нормативна база України для контролю якості лубоволокнистої сировини представлена ДСТУ 8423:2015 «Солома конопляна» [7], який регламентує визначення засміченості, довжини і діаметра стебел, вмісту лубу та розривного навантаження, ДСТУ 8422:2015 «Стебла трести конопель» [8], що встановлює методи контролю засміченості, довжини і діаметра стебел, вмісту волокна та розривного навантаження, а також ГОСТ 9993-2014 «Пенька коротка» [9], який визначає показники засміченості та розривного навантаження. Однак ці стандарти зосереджені переважно на контролі сировини та напівфабрикатів, не враховують специфіку готового конопляного волокна та не передбачають експрес-методів неруйнівного контролю якості.

Критичний аналіз літературних джерел показує, що існуючі методи контролю якості лубоволокнистої сировини мають ряд суттєвих недоліків: низькочастотні акустичні методи неефективні для неоднорідних конопляних волокон, традиційні стандартизовані методи є трудомісткими та руйнівними, а ультразвукові дослідження зосереджені на обробці, а не контролі якості. Це обумовлює необхідність розробки спеціалізованого ультразвукового методу для експрес-контролю якості конопляного волокна.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка ультразвукового методу експрес-контролю якості конопляного волокна та оцінка його ефективності порівняно з існуючими методами контролю.

Викладення основного матеріалу дослідження

Фізичні принципи запропонованого ультразвукового методу базуються на явищі дифракції акустичних хвиль на волокнистих структурах. Конопляне волокно можна розглядати як багатошарову дифракційну решітку, де окремі волокна виступають дифракційними елементами. При проходженні ультразвукової хвилі через волокнисту масу відбувається модифікація акустичного сигналу: зміна амплітуди внаслідок відбиття та розсіювання, а також зміна фази через дифракційні ефекти.

Обґрунтування частотного діапазону 1–5 МГц базується на співвідношенні довжини хвилі та геометричних розмірів конопляних волокон. При частоті 3 МГц довжина хвилі в повітрі становить $\lambda = c/f = 343/3 \times 10^6 \approx 0{,}11$ мм, що є співмірною з діаметром конопляного волокна (15–50 мкм). Це забезпечує оптимальні умови дифракції згідно з критерієм $d \approx \lambda/10$, де d – діаметр волокна. На відміну від низькочастотного методу Кузьміної (500–2000 Гц, $\lambda = 0{,}17$–$0{,}69$ м), де $\lambda \gg d$ і дифракційні ефекти слабкі, ультразвуковий діапазон забезпечує високу чутливість до структурних особливостей окремих волокон.

Кількість волокон у зразку можна визначити за модифікованою формулою:

$$Q = G/(gc \cdot Kн), \quad (1)$$

де Q – кількість волокон; G – загальна маса зразка, г; gc – середня маса одиничного волокна, г; $Kн$ – коефіцієнт неоднорідності.

Коефіцієнт неоднорідності враховує варіабельність діаметра конопляних волокон:

$$Kн = 1 + \sigma d/dcp, \quad (2)$$

де σd – стандартне відхилення діаметра волокон, мм; dcp – середній діаметр волокон, мм.

Ультразвукові вимірювання виконувалися на експериментальній установці з наступними технічними характеристиками: частотний діапазон 1–5 МГц (робоча частота 3 МГц), п’єзокерамічні датчики діаметром 32 мм, точність виміру фазового зсуву ±0,1°, час одного вимірювання 2 хвилини. Для порівняльного аналізу паралельно проводилися вимірювання низькочастотним акустичним методом у діапазоні 500–2000 Гц та традиційними механічними методами згідно з ДСТУ 8423:2015.

Статистична обробка результатів включала розрахунок середніх значень, стандартних відхилень та коефіцієнтів кореляції для $n = 50$ зразків кожного типу. Достовірність різниці між методами оцінювалася за t-критерієм Стьюдента при рівні значущості $p < 0{,}05$.

Порівняльний аналіз ефективності різних методів контролю якості конопляного волокна представлено в таблиці 1.

Експериментально встановлено високу кореляцію ультразвукових показників з традиційними характеристиками якості: лінійна густина ($r = 0{,}92$), розривна прочність ($r = 0{,}89$), ступінь зрілості ($r = 0{,}94$). Відтворюваність результатів характеризується коефіцієнтом варіації $CV = 2{,}1$ % для внутрішньолабораторних вимірювань та $CV = 4{,}3$ % для міжлабораторних порівнянь.

Дослідження впливу неоднорідності волокна показало, що при $\sigma d = 0{,}1$ мм коефіцієнт $Kн = 1{,}1$, а при $\sigma d = 0{,}5$ мм $Kн = 1{,}5$. Врахування цього коефіцієнта дозволило знизити похибку визначення кількості волокон з ±15 % до ±2,5 % порівняно з базовою формулою без корекції на неоднорідність.

На рисунку 2 представлено залежність точності методу від ступеня неоднорідності конопляного волокна.

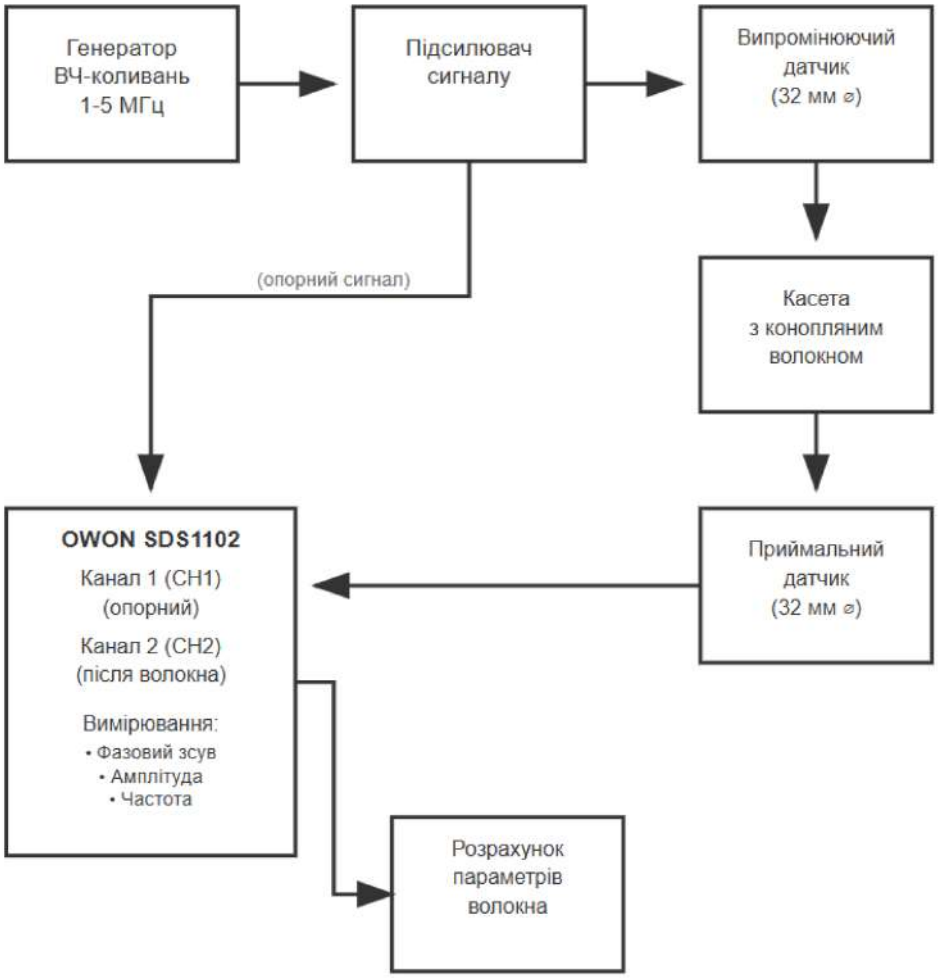


Рис. 1. Блок-схема експериментальної установки

Таблиця 1

Порівняльні характеристики методів контролю якості конопляного волокна

Параметр	Традиційний	Акустичний метод (500–2000 Гц)	Ультразвуковий метод (1–5 МГц)
Точність, %	±10–15	±20	±2,5
Час аналізу, хв	30–60	10	2
Тип контролю	Руйнівний	Неруйнівний	Неруйнівний
Кількість параметрів	2–3	2	5–6
Чутливість до неоднорідності	Низька	Низька	Висока

Висновки

В результаті проведених досліджень розроблено ультразвуковий метод експрес-контролю якості конопляного волокна та експериментально підтверджено його ефективність.

Теоретично обгрунтовано доцільність використання ультразвукового діапазону частот 1–5 МГц для контролю конопляного волокна, що забезпечує оптимальні умови дифракції ($\lambda \approx 0{,}11$ мм при $f = 3$ МГц) порівняно з існуючими низькочастотними методами ($\lambda = 0{,}17$–$0{,}69$ м при 500–2000 Гц).

Розроблено математичну модель, що враховує неоднорідність конопляного волокна через коефіцієнт $K_н = 1 + \sigma d/dcp$, який дозволив підвищити точність визначення кількості волокон з ±15 % до ±2,5 %.

Експериментально встановлено високу кореляцію ультразвукових показників з традиційними характеристиками якості конопляного волокна: лінійна густина ($r = 0{,}92$), розривна прочність ($r = 0{,}89$), ступінь зрілості ($r = 0{,}94$).

Порівняльний аналіз показав переваги ультразвукового методу над існуючими: точність ±2,5 % проти ±20 % низькочастотного акустичного методу, скорочення часу аналізу з 10 до 2 хвилин, неруйнівний характер контролю та можливість одночасного визначення 5–6 параметрів якості.

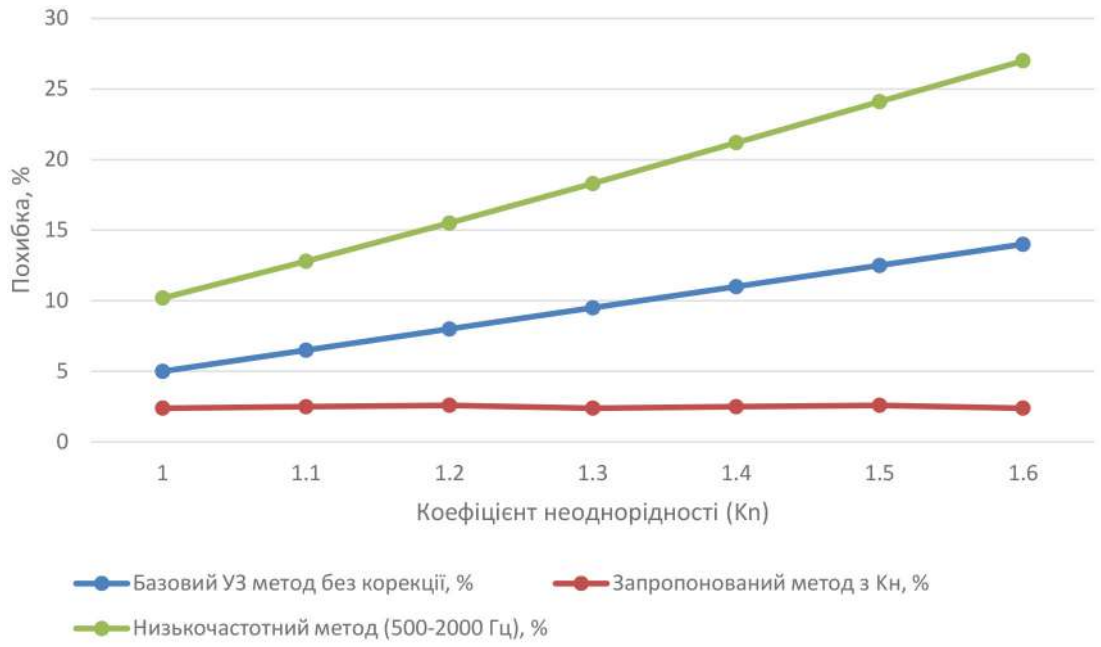


Рис. 2. Залежність похибки визначення параметрів волокна від коефіцієнта неоднорідності

Розроблена експериментальна установка на базі цифрового осцилографа OWON SDS1102 забезпечує відтворюваність результатів з коефіцієнтом варіації $CV = 2{,}1$ % для внутрішньолабораторних вимірювань.

Запропонований метод може бути рекомендований для впровадження на підприємствах текстильної промисловості як ефективний засіб експрес-контролю якості лубоволокнистої сировини.

Список використаної літератури

1. Кузьміна Т. О., Толмачов В. С., Єдинович М. Б., Валько М. І., Мамай О. І. Розроблення методу аналізування лляного волокна на основі його акустичних властивостей // Стандартизація. Сертифікація. Якість. 2019. № 3. С. 44–54.

2. Толмачов В.С. Удосконалення методів контролю якості лляного волокна на основі сенсорного аналізу: автореф. дис.... канд. техн. наук / В. С. Толмачов; Херсон. нац. техн. ун-т. Херсон, 2012. 20 с. https://uacademic.info/ua/document/0413U002588

3. Sullivan Renouard, Christophe Hano, Joël Doussot, Jean-Philippe Blondeau, Eric Lainé. Characterization of ultrasonic impact on coir, flax and hemp fibers // Materials Letters. 2014. Vol. 129. P. 137-141. DOI:10.1016/j.matlet.2014.05.018

4. Shahzad A. Hemp fiber and its composites – a review // Journal of Composite Materials. 2012. Vol. 46(8). P. 973–986. DOI:10.1177/0021998311413623

5. Pickering K. L., Beckermann G. W., Alam S. N., Foreman N. J. Optimising industrial hemp fiber for composites // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2007. Vol. 38(2). P. 461–468. DOI:10.1016/j.compositesa.2006.02.020

6. Ming Liu, Dinesh Fernando, Anne S. Meyer, Bo Madsen, Geoffrey Daniel, Anders Thygesen. Characterization and biological depectinization of hemp fibers originating from different stem sections // Industrial Crops and Products. 2015. Vol. 76. P. 880–891. DOI:10.1016/j.indcrop.2015.07.046

7. ДСТУ 8423:2015. Солома конопляна. Технічні умови. [Чинний від 2016-07-01]. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 12 с.

8. ДСТУ 8422:2015. Стебла трести конопель. Технічні умови. [Чинний від 2016-07-01]. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 8 с.

9. ГОСТ 9993-2014. Пенька коротка. Технічні умови. [Чинний від 2015-07-01]. М. : Стандартинформ, 2015. 6 с.

References

1. Kuzmina, T. O., Tolmachov, V. S., Yedynovych, M. B., Valko, M. I., Mamai, O. I. (2019). Rozroblennia metodu analizuvannia llianoho volokna na osnovi yoho akustychnykh vlastyvostei [Development of a method for analyzing flax fiber based on its acoustic properties]. Standartyzatsiia. Sertyfikatsiia. Yakist – Standardization. Certification. Quality, 3, 44–54. [in Ukrainian].

2. Tolmachov, V.S. (2012). Udoskonalennia metodiv kontroliu yakosti llianoho volokna na osnovi sensornoho analizu [Improvement of flax fiber quality control methods based on sensory analysis]. Extended abstract of candidate's thesis. Kherson : KhNTU. Retrieved from https://uacademic.info/ua/document/0413U002588 [in Ukrainian].

3. Sullivan Renouard, Christophe Hano, Joël Doussot, Jean-Philippe Blondeau, Eric Lainé. (2014). Characterization of ultrasonic impact on coir, flax and hemp fibers. Materials Letters, 129, 137–141. DOI: 10.1016/j.matlet.2014.05.018

4. Shahzad, A. (2012). Hemp fiber and its composites – a review. Journal of Composite Materials, 46(8), 973–986. DOI: 10.1177/0021998311413623

5. Pickering, K. L., Beckermann, G. W., Alam, S. N., Foreman, N. J. (2007). Optimising industrial hemp fiber for composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 38(2), 461–468. DOI:10.1016/j.compositesa.2006.02.020

6. Ming Liu, Dinesh Fernando, Anne S. Meyer, Bo Madsen, Geoffrey Daniel, Anders Thygesen. (2015). Characterization and biological depectinization of hemp fibers originating from different stem sections. Industrial Crops and Products, 76, 880–891. DOI: 10.1016/j.indcrop.2015.07.046

7. DSTU 8423:2015. (2016). Soloma konopljana. Tekhnichni umovy [Hemp straw. Technical specifications]. Kyiv : DP "UkrNDNC" [in Ukrainian].

8. DSTU 8422:2015. (2016). Stebla tresty konopel. Tekhnichni umovy [Hemp retted stems. Technical specifications]. Kyiv : DP "UkrNDNC" [in Ukrainian].

9. GOST 9993-2014. (2015). Penka korotka. Tekhnichni umovy [Short hemp. Technical specifications]. Moscow : Standartinform [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 24.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 544.723:546.95:551.524.2 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.43

О. М. КАМІНСЬКИЙ
кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0003-1971-8437

Р. О. ДЕНИСЮК
кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0003-3077-3795

М. В. ЧАЙКА
кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0001-5356-9856

С. В. КУЧЕРУК
доктор філософії з галузі знань Хімічна та біоінженерія, доцент,
доцент кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0002-5978-487X

Д. Ю. ПАНАСЮК
асистент кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0009-0005-9490-1823

О. В. АНІЧКІНА
кандидат педагогічних наук, доцент,
завідувач кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0003-4843-0707

О. Ю. АВДЄЄВА
доктор філософії з галузі знань 01 Освіта/Педагогіка, доцент,
доцент кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0001-6550-0776

Ю. В. ЛИСЕЦЬКА
старший викладач кафедри англійської філології та перекладу
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0002-6747-5858

ПРОЦЕСИ СОРБЦІЇ ІОННИХ ФОРМ НІКЕЛЮ(II) З ВОДНИХ РОЗЧИНІВ НАНОРОЗМІРНИМ МАГНЕТИТОМ

На сучасному етапі розвитку науки та промисловості забруднення навколишнього середовища, зокрема водойм, вважається однією з найважливіших глобальних проблем людства. Зокрема, однією з ключових цілей на 2030 рік у країнах ЄС є гарантування доступності та довгострокового забезпечення водопостачання та санітарії для всіх, як це зазначено в шостій цілі сталого розвитку (ЦСР), тому пошук ефективних методів очистки води до стану питної залишається актуальним питанням сьогодення.

© Камінський О. М., Денисюк Р. О., Чайка М. В., Кучерук С. В., Панасюк Д. Ю., Анічкіна О. В., Авдєєва О. Ю., Лисецька Ю. В., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

У даній роботі виконано синтез нанорозмірного магнетиту золь-гель методом Елмора. Методами рентгенівської спектроскопії ідентифіковано фази Fe_3O_4. *Методом Шеррера розраховано, що середній розмір частинок магнетиту становить 75,93 нм.*

Визначено, що ступінь вилучення іонних форм Нікелю(II) з водних розчинів 57,5 % досягається протягом перших 40–50 хвилин від початку контакту між компонентами. Сорбційна рівновага настає протягом 60 хвилин від початку контакту на межі поділу фаз. Показано, що кінетику сорбції іонних форм Нікелю(II) з розчину поверхнею магнетиту можна описати моделлю псевдо-другого порядку Хо-Маккея, яка вказує на міжчастинкову взаємодію між іонами сорбату на межі поділу фаз за рахунок міжмолекулярних сил.

Встановлено, що характер кривої ізотерми нагадує криві ізотерм Ленгмюра (L2-тип) відповідно до класифікації Гільса з виходом на насичення, а сорбційна ємність становить 19,2 мг/г.

Показано, що ізотерма адсорбції іонних форм Нікелю(II) задовільно описується моделлю Ленгмюра, в порівнянні з іншими моделями, що можна побачити з величини коефіцієнта кореляції ($R^2 = 0,997$), *тобто адсорбція іонних форм Нікелю(II) відбувається на гомогенних (однорідних) центрах поверхні магнетиту, де всі активні центри є енергетично однорідними і на поверхні може утворюватись лише мономолекулярний шар сорбату.*

Розрахована енергія адсорбції за рівнянням Дубініна-Радушкевича для поверхні адсорбенту не перевищує 2 кДж/моль, що вказує на фізичну адсорбцію іонних форм Нікелю(II) з водних розчинів поверхнею магнетиту.

Ключові слова: *іонні форми Нікелю(II), магнетит, сорбція, кінетика сорбції, ізотерми сорбції, моделі ізотерм, фізична та колоїдна хімія.*

O. M. KAMINSKIY
Ph.D. in Chemistry, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0003-1971-8437

R. O. DENYSIUK
Ph.D. in Chemistry, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0003-3077-3795

M. V. CHAYKA
Ph.D. in Chemistry, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0002-5978-487X

S. V. KUCHERUK
Ph.D. in the Field of Knowledge “Chemical and Bioengineering”,
Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0002-5978-487X

D. YU. PANASIUK
Assistant at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0009-0005-9490-1823

O. V. ANICHKINA
Ph.D. in Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0003-4843-0707

O. YU. AVDIEIEVA
Ph.D. in the Field of Knowledge 01 Education/Pedagogy, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0001-6550-0776

YU. V. LYSETSKA
Senior Lecturer at the Department of English Philology and Translation
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0002-6747-5858

PROCESSES OF SORPTION OF IONIC FORMS OF NICKEL(II) FROM AQUEOUS SOLUTIONS BY NANOSIZED MAGNETITE

At the current stage of development of science and industry, environmental pollution, in particular water bodies, is considered one of the most important global problems of mankind. In particular, one of the key goals for 2030 in the EU countries is to guarantee accessibility and long-term provision of water supply and sanitation for all, as stated in the sixth goal of sustainable development (SDG), therefore, the search for effective methods of purifying water to a drinking state remains an urgent issue of today.

In this work, the synthesis of nanosized magnetite sol-gel by the Elmore method was performed. The Fe_3O_4 *phases were identified by X-ray spectroscopy methods. The average size of magnetite particles was calculated by the Scherrer method to be 75.93 nm.*

It was determined that the degree of extraction of ionic forms of Nickel(II) from aqueous solutions of 57.5 % is achieved during the first 40–50 minutes from the beginning of contact between the components. Sorption equilibrium occurs within 60 minutes from the beginning of contact at the interface. It is shown that the kinetics of sorption of ionic forms of Nickel(II) from a solution by the magnetite surface can be described by the pseudo-second-order Ho-McKay model, which indicates interparticle interaction between sorbate ions at the phase interface due to intermolecular forces.

It was established that the character of the isotherm curve resembles the Langmuir isotherm curves (L2-type) according to the Giles classification with saturation, and the sorption capacity is 19.2 mg/g.

It is shown that the adsorption isotherm of ionic forms of Nickel(II) is satisfactorily described by the Langmuir model, in comparison with other models, which can be seen from the value of the correlation coefficient ($R^2 = 0.997$*), i.e. the adsorption of ionic forms of Nickel(II) occurs on homogeneous (homogeneous) centers of the magnetite surface, where all active centers are energetically homogeneous and only a monomolecular layer of sorbate can form on the surface. The calculated adsorption energy according to the Dubinin-Radushkevich equation for the adsorbent surface does not exceed 2 kJ/mol, which indicates the physical adsorption of ionic forms of Nickel(II) from aqueous solutions by the magnetite surface.*

Key words: *ionic forms of Nickel(II), magnetite, sorption, sorption kinetics, sorption isotherms, isotherm models, physical and colloidal chemistry.*

Постановка проблеми

На сучасному етапі розвитку технологій очистки водойм процеси сорбції займають достойне місце, оскільки вони є досить ефективними через простоту використання, різноманітність сорбентів, високу швидкість процесу, економічність тощо.

Сорбційне вилучення забруднювачів, таких як іони важких металів, досить широко використовують у розробці ефективних методів очистки забруднених та стічних промислових водойм.

До найбільш поширених іонів важких металів, які потрапляють до водойм з тих чи інших джерел, можна віднести іони Cu^{2+}, Pb^{2+}, Cd^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+} та інші. Надзвичайно шкідливий вплив іонів важких металів на флору і фауну давно відомий, тому пошук ефективних методів очистки водойм від іонів важких металів залишається актуальним завданням. Також проблема чистої води в Україні ще більш загострюється через воєнні дії, наслідком яких є потрапляння до водойм забруднювачів, що містять важкі метали.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі [1] здійснено синтез магнітного біовугілля (MJRB) із шкаралупи *Juglans Regia* та використано у якості адсорбенту для вилучення іонів Cu^{2+} та Ni^{2+} з водних розчинів. Встановлено, що ступінь вилучення іонів Cu^{2+} та Ni^{2+} становить 98,30 % та 98,10 % відповідно, а адсорбційна ємність за оптимальних умов сорбції становить 16,83 мг/г та 18,11 мг/г відповідно. Показано, що поверхня MJRB має високопористу структуру, що вказує на вищу здатність адсорбувати іони металів. Адсорбент був аморфним і мав розмір кристалітів 3,043 нм. Виявлено, що MJRB володіє помірними магнітними властивостями зі значенням питомої намагніченості насичення 20 emu/г, що є достатнім для вилучення Cu^{2+} та Ni^{2+} з водних розчинів під час магнітної сепарації. Показано, що ізотерми адсорбції узгоджуються з моделлю ізотерми Ленгмюра.

У дослідженні авторами [2] одержано новий потрійний композитний аерогель з використанням хромового фериту ($Cr_{0.1}Fe_{2.9}O_4$), відновленого оксиду графену (rGO) та етилендіамінтетраоцтової кислоти (ЕДТА). Отриманий нанокомпозит використано для адсорбції іонів Cu^{2+} та Ni^{2+} з водних розчинів. Визначено оптимальні умови адсорбції (вплив pH, маси адсорбенту та інше). Визначено, що адсорбційна ємність 310,81 мг/г для Cu^{2+} була досягнута з використанням 45 мг адсорбенту при pH = 5 та температурі 25 °C, а якщо pH підвищити до 6, а температуру до 35 °C, то адсорбційна ємність 45 мг адсорбенту для Ni^{2+} збільшується до 316,25 мг/г. Показано, що процес адсорбції Cu^{2+} та Ni^{2+} аерогелем $Cr_{0.1}Fe_{2.9}O_4$/rGO/EDTA описується кінетичною моделлю псевдо-другого порядку та моделлю

Ленгмюра. Термодинамічні параметри вказують на те, що процес адсорбції є спонтанним ендотермічним процесом. Максимальна адсорбційна ємність адсорбенту для Cu^{2+} та Ni^{2+} становить 334,89 мг/г та 345,52 мг/г відповідно. Визначено, що після п'яти циклів використання ступінь вилучення іонів все ще перевищує 68,99 %.

У оглядовій статті [3] розглянуто процеси біосорбції іонів Mn^{2+} та Ni^{2+} з водних розчинів різноманітними біосорбентами, що виготовлені на основі біомаси водоростей, грибів, лушпиння зелених помідорів, кукурудзяних качанів тощо.

Однак слід відмітити, що джерел, які детально описують процеси сорбції іонних форм Нікелю(II) з водних розчинів поверхнями наношпінелей (серед яких є магнетит) є недостатня кількість, що також аргументовано як актуальність даного дослідження.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є вивчення процесів адсорбції іонних форм Нікелю(II) з водних розчинів поверхнею нанорозмірного магнетиту.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для дослідження адсорбційної активності поверхні нанорозмірного магнетиту проведено золь-гель синтез методом співосадження (Елмора) [4–5] у відповідність до іонної реакції:

$$Fe^{2+} + 2Fe^{3+} + 8NH_3 + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 8NH_4^+$$

Для синтезу використано такі матеріали: $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ марки «ч.д.а.», $FeCI_3 \cdot 6H_2O$ марки «ч.», 25 % водний розчин NH_3 марки «ч.д.а.».

Одержаний магнетит осаджували в магнітному полі, промивали дистильованою водою до нейтральної реакції та висушували на повітрі протягом декількох діб.

З метою підтвердження структури синтезованого магнетиту проведено дослідження методами рентгенівської спектроскопії (XRD) за допомогою рентгенівського дифрактометра ДРОН-3М (випромінювання міді, лінія $K\alpha$, $\lambda = 0{,}1540$ нм). Отриману XRD дифрактограму проаналізовано за допомогою програмного забезпечення «MATCH!4».

На рис. 1 зображено дифрактограму магнетиту.

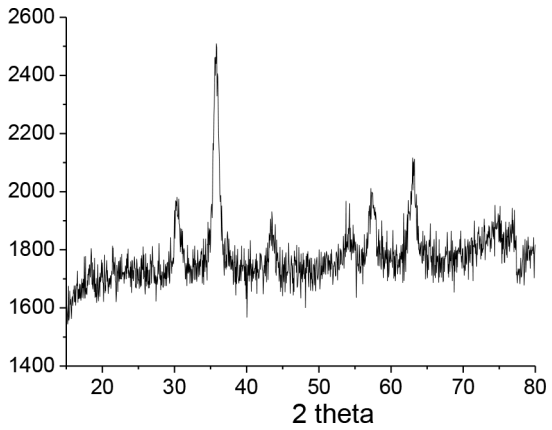


Рис. 1. Дифрактограма магнетиту

Під час аналізу дифрактограми виявлено фазу магнетиту, характеристичні піки якої знаходяться при 30,42; 35,77; 43,50; 53,76; 57,39; 63,09 та 74,64 2θ кутах.

Для розрахунку середнього розміру частинок магнетиту для даних кутів 2θ використано метод Шеррера з використанням формули [6]:

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos\theta}, \quad (1)$$

де D – середній розмір частинок, нм; K – константа Шеррера, яка для кристалічних систем має середнє значення 0,92; λ – довжина хвилі рентгенівського випромінювання (лінія $K\alpha = 0{,}1540$ нм); β – кутова напівширина дифракційного максимуму за характерних індексів Міллера (hkl) для кристалічної решітки; θ – кут рентгенівської дифракції.

У табл. 1 наведено основні розрахункові дані характеристик елементарної комірки та середній розмір частинок магнетиту.

Встановлено, що середній розмір частинок Fe_3O_4 за даними рентгенівської дифракції становить 75,93 нм.

Для дослідження процесів сорбції іонних форм Нікелю(II) з водних розчинів поверхнею магнетиту розчини іонів Ni^{2+} з концентраціями від 10–200 мг/л готували із стандартних водних розчинів нітратних солей з доведенням відповідної аліквоти до мітки в мірній колбі за допомогою ацетатно-аміачного буферу до pH = 6,5–8,5.

Таблиця 1

Основні розрахункові дані характеристик елементарної комірки та середній розмір частинок магнетиту

2θ	$d_{(hkl)}$	*hkl*	β	*D*, нм
30,42	2,9462	202	0,969	8,68
35,77	2,5126	311	0,882	9,67
43,50	2,0833	400	0,929	9,41
53,76	1,7010	422	0,019	483,58
57,39	1,6037	511	1,004	9,22
63,09	1,4731	404	0,900	10,58
74,64	1,2708	533	26,293	0,39

Сорбцію іонних форм Нікелю(II) з водних розчинів здійснювали у статичному режимі при pH = 7,9–8,5 за кімнатної температури. До 0,03 г сорбенту додавали 5 мл розчину солі відповідної концентрації і струшували протягом 3 годин на шейкері, далі розчин відділяли від сорбенту за допомогою постійного магніту. Концентрацію іонів Ni^{2+} до та після сорбції визначали атомно-абсорбційним методом за допомогою полум'яного спектрофотометра С-115-ПК у полум'яній суміші ацетилен-повітря за довжини спектральної лінії 232,0 нм.

Сорбційну ємність A (мг/г) поверхні магнетиту розраховували за формулою:

$$A = \frac{(C_0 - C_p) \cdot V}{m}, \quad (2)$$

де C_0 і C_p – концентрація вихідного розчину іонних форм Нікелю(II) та розчину після сорбції (мг/л), V – об'єм розчину (л), m – наважка сорбенту (г).

Ступінь вилучення R, % іонних форм Нікелю(II) з водних розчинів розраховували за формулою:

$$R = \frac{(C_0 - C_p)}{C_0} \cdot 100\ \%. \quad (3)$$

Для визначення механізмів сорбції іонних форм Нікелю(II) одержані кінетичні криві проаналізовано відповідно до моделей псевдо-першого порядку Лагергрена та псевдо-другого порядку Хо-Маккея [7].

З метою аналізу ізотерми сорбції іонних форм Нікелю(II) використано математичні моделі адсорбції Ленгмюра, Фрейндліха, Тьомкіна та Дубініна-Радушкевича [8–9].

Як відомо з літературних джерел [10], у середовищі ацетатно-аміачного буферу за pH = 7,9–8,5 можуть утворюватися такі іонні форми Нікелю(II):

$$[Ni(CH_3COO)_4]^{2-} \leftrightarrow [Ni(H_2O)_4]^{2+} \leftrightarrow [Ni(NH_3)_4]^{2+}$$

Для іонів Нікелю(II) характерне утворення комплексів з координаційним числом 4 у водних розчинах, проте також можливе утворення комплексів з координаційним числом 6.

На рис. 2 показано залежність ступеня вилучення іонних форм Нікелю(II) з розчину поверхнею магнетиту від часу контакту.

Як видно з рис. 2, ступінь вилучення 57,5 % досягається протягом перших 40–50 хвилин від початку контакту між компонентами. Адсорбційна рівновага настає протягом 60 хвилин на межі поділу фаз.

Визначено, що кінетику сорбції іонних форм Нікелю(II) з розчину поверхнею магнетиту можна описати моделлю псевдо-другого порядку Хо-Маккея ($R^2 = 0{,}999$), яка вказує на міжчастинкову взаємодію між іонами сорбату на межі поділу фаз за рахунок міжмолекулярних сил. Лімітуючою стадією процесу сорбції є хімічна реакція обміну між частинками на межі поділу «сорбат-сорбент».

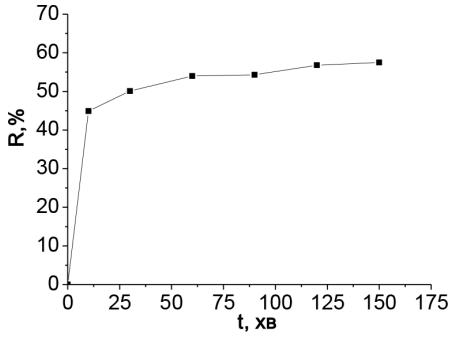


Рис. 2. Залежність ступеня вилучення іонних форм Нікелю(II) з розчину поверхнею магнетиту від часу контакту

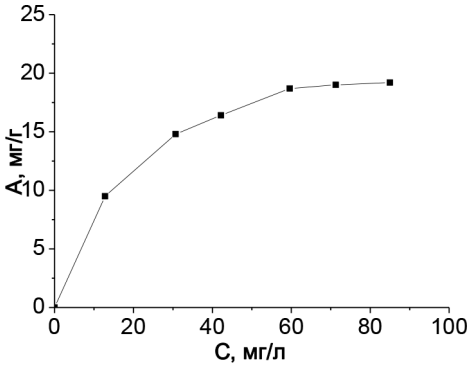


Рис. 3. Ізотерма адсорбції іонних форм Нікелю(II) з розчину поверхнею магнетиту

На рис. 3 зображено ізотерму адсорбції іонних форм Нікелю(II) поверхнею магнетиту.

Встановлено, що характер кривої ізотерми нагадує криві ізотерм Ленгмюра (L2-тип) відповідно до класифікації Гільса [11], з виходом на насичення. Такий тип ізотерм характерний для сорбентів, на поверхні яких утворюється мономолекулярний шар сорбату. Сорбційна ємність становить 19,2 мг/г.

Одержані експериментальні дані проаналізовано відповідно до моделей ізотерм Ленгмюра, Фрейндліха, Тьомкіна та Дубініна-Радушкевича.

Показано, що ізотерма адсорбції іонних форм Нікелю(II) задовільно описується моделлю Ленгмюра, в порівнянні з іншими моделями, що можна побачити з величини коефіцієнта кореляції (R^2 = 0,997), тобто адсорбція іонних форм Нікелю(II) відбувається на гомогенних (однорідних) центрах поверхні магнетиту, де всі активні центри є енергетично однорідними і на поверхні може утворюватись лише мономолекулярний шар сорбату.

Розраховано енергію адсорбції за рівнянням Дубініна-Радушкевича для поверхні магнетиту, яка становить 1,497 кДж/моль. Дана величина вказує на фізичну адсорбцію іонних форм Нікелю(II) з водних розчинів поверхнею магнетиту.

Висновки

У роботі виконано синтез нанорозмірного магнетиту золь-гель методом Елмора. Методами рентгенівської спектроскопії ідентифіковано фази Fe_3O_4. Методом Шеррера розраховано, що середній розмір частинок магнетиту становить 75,93 нм.

Визначено, що ступінь вилучення іонних форм Нікелю(II) з водних розчинів 57,5 % досягається протягом перших 40–50 хвилин від початку контакту між компонентами. Адсорбційна рівновага настає протягом 60 хвилин на межі поділу фаз. Показано, що кінетику сорбції іонних форм Нікелю(II) з розчину поверхнею магнетиту можна описати моделлю псевдо-другого порядку Хо-Маккея, яка вказує на міжчастинкову взаємодію між іонами сорбату на межі поділу фаз за рахунок міжмолекулярних сил.

Встановлено, що характер кривої ізотерми нагадує криві ізотерм Ленгмюра (L2-тип) відповідно до класифікації Гільса з виходом на насичення, а сорбційна ємність становить 19,2 мг/г (маса сорбенту 0,03 г, об'єм розчину – 5 мл, pH = 7,9–8,5, $C_0(Ni^{2+}$ у розчині) – 200 мг/л).

Показано, що ізотерма сорбції іонних форм Нікелю(II) задовільно описується моделлю Ленгмюра, в порівнянні з іншими моделями, що можна побачити з величини коефіцієнта кореляції (R^2 = 0,997), тобто сорбція іонних форм Нікелю(II) відбувається на гомогенних (однорідних) центрах поверхні магнетиту, де всі активні центри є енергетично однорідними і на поверхні може утворитись лише мономолекулярний шар сорбату.

Розрахована енергія сорбції за рівнянням Дубініна-Радушкевича для поверхні адсорбенту не перевищує 2 кДж/моль, що вказує на фізичну адсорбцію іонних форм Нікелю(II) з водних розчинів поверхнею магнетиту.

Список використаної літератури

1. Isaac R., Siddiqui Sh., Aldosari O. F., Uddin M. K. Magnetic biochar derived from Juglans regia for the adsorption of Cu^{2+} and Ni^{2+}: Characterization, modelling, optimization, and cost analysis. *Journal of Saudi Chemical Society*. 2023. Vol. 27, Is. 6. 101749. DOI: 10.1016/j.jscs.2023.101749

2. Qiao Y., Zhang S., Ou N., Shen L. Adsorption performance and mechanism of EDTA-modified $Cr_{0.1}Fe_{2.9}O_4$/rGO aerogel for Cu^{2+} and Ni^{2+}. *Journal of Solid State Chemistry*. 2025. Vol. 350. 125523. DOI: 10.1016/j.jssc.2025.125523

3. Khan A., Naeem A., Muhammad N., Hussain Sh., Jamil I., Shah I. A critical review of biosorption of manganese (Mn^{2+}) and nickel (Ni^{2+}) ions from aqueous solutions. *Desalination and Water Treatment*. 2023. Vol. 284. P. 151–158. DOI: 10.5004/dwt.2023.29284

4. Petranovska A. L., Abramov N. V., Turanska S. P., Gorbyk P. P., Kaminskiy A. N., Kusyak N. V. Adsorption of cis dichlorodiammineplatinum by nanostructures based on single-domain magnetite. *J. Nanostruct. Chem*. 2015. Vol. 5, No 3. P. 275–285. DOI: 10.1007/s40097-015-0159-9

5. Камінський О. М., Денисюк Р. О., Чайка М. В., Писаренко С. В., Панасюк Д. Ю. Сорбція йонних форм Цинку(II) з водних розчинів поверхнями магніточутливих нанокомпозитів, модифікованих гідроксиапатитом. *Український журнал природничих наук*. 2023. № 5. С. 70–79. DOI: 10.32782/naturaljournal.5.2023.85

6. Shehata M. M., Waly S. A., Abdelaziz Y. A. Effect of Gd^{3+} doping on structural and optical properties of MgO-$MgAl_2O_4$ nanocomposites synthesized via co-precipitation method. *J Mater Sci: Mater Electron*. 2021. Vol. 32. P. 7423–7430. DOI: 10.1007/s10854-021-05455-y

7. Писаренко С. В., Камінський О. М., Денисюк Р. О., Євдоченко О. С., Анічкіна О. В., Авдєєв С. В. Дослідження процесу адсорбції метиленового синього поверхнею калій титанату. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 9. С. 123–132. DOI: 10.32782/naturaljournal.9.2024.12

8. Tripathy S., Raichur A. Abatement of fluoride from water using manganese dioxide-coated activated alumina. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 153, No 3. P. 1043–1051. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.100

9. Onyango M., Kojima Y., Aoyi O., Bernardo E., Matsuda H. Adsorption equilibrium modeling and solution chemistry dependence of fluoride removal from water by trivalent-cation-exchanged zeolite F-9. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 279, No 2. P. 341–350. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.06.038

10. Baes Ch. F., Mesmer R. E. The hydrolysis of cations. *Wiley: New Jork*. 1976. 512 p.

11. Giles C. H., MacEwan T. H., Nakhwa S. N., Smith D. Studies in Adsorption: Part XI. A System of Classification of Solution Adsorption Isotherms and Its Use in Diagnosis of Adsorption Mechanisms and in Measurement of Specific Surface Area Solids. *Journal of the Chemical Society*. 1960. Vol. 14. P. 3973–3993. DOI: 10.1039/jr9600003973

References

1. Isaac, R., Siddiqui, Sh., Aldosari, O. F., Uddin, M. K. Magnetic biochar derived from Juglans regia for the adsorption of Cu^{2+} and Ni^{2+}: Characterization, modelling, optimization, and cost analysis. *Journal of Saudi Chemical Society*. 2023. Vol. 27, Is. 6. 101749. DOI: 10.1016/j.jscs.2023.101749

2. Qiao, Y., Zhang, S., Ou, N., Shen, L. Adsorption performance and mechanism of EDTA-modified $Cr_{0.1}Fe_{2.9}O_4$/rGO aerogel for Cu^{2+} and Ni^{2+}. *Journal of Solid State Chemistry*. 2025. Vol. 350. 125523. DOI: 10.1016/j.jssc.2025.125523

3. Khan, A., Naeem, A., Muhammad, N., Hussain, Sh., Jamil, I., Shah, I. A critical review of biosorption of manganese (Mn^{2+}) and nickel (Ni^{2+}) ions from aqueous solutions. *Desalination and Water Treatment*. 2023. Vol. 284. P. 151–158. DOI: 10.5004/dwt.2023.29284

4. Petranovska, A. L., Abramov, N. V., Turanska, S. P., Gorbyk, P. P., Kaminskiy, A. N., Kusyak, N. V. Adsorption of cis dichlorodiammineplatinum by nanostructures based on single-domain magnetite. *J. Nanostruct. Chem*. 2015. Vol. 5, No 3. P. 275–285. DOI: 10.1007/s40097-015-0159-9

5. Kaminskyi, O. M., Denysiuk, R. O., Chaika, M. V., Pysarenko, S. V., Panasiuk, D. Yu. Sorbtsiia yonnykh form Tsynku(II) z vodnykh rozchyniv poverkhniamy mahnitochutlyvykh nanokompozytiv, modyfikovanykh hidroksyapatytom [Sorption of ionic forms of Zinc (II) from aqueous solutions by surfaces of magneto-sensitive nanocomposites modified with hydroxyapatite]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychykh nauk*. 2023. № 5. S. 70–79. DOI: 10.32782/naturaljournal.5.2023.8. [in Ukrainian].

6. Shehata, M. M., Waly, S. A., Abdelaziz, Y. A. Effect of Gd^{3+} doping on structural and optical properties of MgO-$MgAl_2O_4$ nanocomposites synthesized via co-precipitation method. J Mater Sci: Mater Electron. 2021. Vol. 32. P. 7423–7430. DOI: 10.1007/s10854-021-05455-y

7. Pysarenko, S. V., Kamins′kyy, O. M., Denysyuk, R. O., Yevdochenko, O. S., Anichkina, O. V., Avdyeyev, S. V. Doslidzhennya protsesu adsorbtsiyi metylenovoho syn′oho poverkhneyu kaliy tytanatu [Study of the process of adsorption of methylene blue by the surface of potassium titanate]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychykh nauk*. 2024. № 9. S. 123–132. DOI: 10.32782/naturaljournal.9.2024.12 [in Ukrainian]

8. Tripathy, S., Raichur, A. Abatement of fluoride from water using manganese dioxide-coated activated alumina. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 153, No 3. P. 1043–1051. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.100

9. Onyango, M., Kojima, Y., Aoyi, O., Bernardo, E., Matsuda, H. Adsorption equilibrium modeling and solution chemistry dependence of fluoride removal from water by trivalent-cation-exchanged zeolite F-9. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 279, No 2. P. 341–350. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.06.038

10. Baes, Ch. F., Mesmer, R. E. The hydrolysis of cations. *Wiley: New Jork*. 1976. 512 p.

11. Giles, C. H., MacEwan, T. H., Nakhwa, S. N., Smith, D. Studies in Adsorption: Part XI. A System of Classification of Solution Adsorption Isotherms and Its Use in Diagnosis of Adsorption Mechanisms and in Measurement of Specific Surface Area Solids. *Journal of the Chemical Society*. 1960. Vol. 14. P. 3973–3993. DOI: 10.1039/jr9600003973

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 685.3; 615.477; 615.477:685.3;
615.477:616.7-007.24; 687.016:615.477; 617.3; 646.47 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.44

Н. В. КУЗІНА
аспірантка кафедри технології моди
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0009-0009-2586-3762

Л. П. ЧЕРТЕНКО
кандидат технічних наук,
доцент кафедри технології моди
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0003-4321-8475

В. П. КЕРНЕШ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри технології моди
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0003-0572-4107

Т. М. ЛИПСЬКИЙ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри технології моди
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0003-4166-6581

СТАН, ВИКЛИКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ВИГОТОВЛЕННЯ ОРТОПЕДИЧНОГО ВЗУТТЯ В УКРАЇНІ В УМОВАХ ВІЙНИ

Мета. *Аналіз сучасного стану ортопедичного виробництва в Україні в умовах повномасштабної війни, з особливою увагою на виготовлення індивідуального ортопедичного взуття. Ідентифікація основних проблем сектору та перспективи їх вирішення із залученням сучасних прогресивних підходів та цифрових технологій. Дослідження шляхів налагодження процесу розробки та виробництва індивідуального ортопедичного взуття шляхом залучення цифрових технологій та ефективних форматів взаємодії із науково-технічними лабораторіями та профільними спеціалістами на прикладі окремого практичного експерименту.*

Методи. *Проведено аналітичний огляд, що включає використання статистичних даних про реабілітаційні центри та ортопедичні підприємства, контент-аналіз нормативних документів і програм забезпечення засобами реабілітації, а також порівняльний аналіз технологій та витрат на виготовлення стандартного та ортопедичного взуття за індивідуальним замовленням. Проведено тематичне дослідження у вигляді практичного експерименту з виготовлення ортопедичного взуття з урахуванням індивідуальних потреб військовослужбовця з інвалідністю з використанням сучасних цифрових технологій із залученням різних структур.*

Результати. *Ортопедична галузь України в умовах війни та різкого зросту потреби в ортопедичних виробах зіткнулася зі скороченням кількості виробництв через їх руйнування та з дефіцитом кваліфікованих кадрів через міграцію та брак освітніх програм. З'ясовано, що лише близько 20 % виробництв ортопедичного профілю в Україні виготовляють ортопедичне взуття за індивідуальним замовленням. Виявлено та проаналізовано низку системних проблем, що ускладнюють роботу сектору та перешкоджають забезпеченню пацієнтів ортопедичною продукцією.*

В межах тематичного дослідження розроблено адаптивні черевики для реабілітаційного та після реабілітаційного періодів лікування військовослужбовця після поранення, що базуються на сучасних принципах біомеханіки та індивідуалізації конструкції. Розроблену пару взуття виготовлено в форматі співпраці науково-технічної лабораторії з використанням цифрових технологій, виробничої дільниці, оснащеної обладнанням для взуттєвого виробництва, та за консультаційної підтримки фахового лікаря.

Наукова новизна. *Вперше проведено комплексний аналіз, що охоплює технологічні, економічні та організаційні аспекти діяльності підприємств, які спеціалізуються на виготовленні ортопедичного взуття за індивідуальним замовленням. Запропоновано модель колаборації наявних виробництв з ортопедичними центрами та науково-технічними лабораторіями шляхом впровадження нових ланок у виробничий процес з метою підвищення ефективності виробництва ортопедичного взуття на індивідуальне замовлення. Проведено тематичне дослідження процесу розробки та виробництва ортопедичного взуття в форматі взаємодії окремих структур на*

© Кузіна Н. В., Чертенко Л. П., Кернеш В. П., Липський Т. М., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

прикладі окремого практичного експерименту з виготовлення взуття за індивідуальним замовленням для реабілітації пацієнта після поранення.

Практична значущість. *Результати аналізу ситуації в секторі виробництва ортопедичного взуття дали змогу виявити проблеми, які можуть бути вирішені шляхом оптимізації алгоритмів виробничих процесів, залучення новітніх технологій та фахових спеціалістів. Ці кроки створять передумови для формування конкурентоспроможного сектору, здатного оперативно реагувати на сучасні виклики та потреби пацієнтів. Результати проведеного дослідження містять рекомендації стосовно оптимізації процесу виробництва ортопедичного взуття за допомогою використання наявних виробничих потужностей та залучення на підготовчих етапах окремих зовнішніх структур та цифрового обладнання з метою вдосконалення виробничого процесу та підвищення рівня ортопедичної продукції.*

Ключові слова: *ортопедичне взуття, реабілітація, 3D-друк, індивідуальне замовлення.*

N. V. KUZINA
Postgraduate Student at the Department of Fashion Technology
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0009-0009-2586-3762

L. P. CHERTENKO
Candidate of Technical Sciences,
Lecturer at the Department of Fashion Technology
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0003-4321-8475

V. P. KERNESH
Candidate of Technical Sciences,
Lecturer at the Department of Fashion Technology
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0003-0572-4107

T. M. LYPSKYI
Candidate of Technical Sciences,
Lecturer at the Department of Fashion Technology
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0003-4166-6581

ORTHOPEDIC MANUFACTURING IN UKRAINE DURING WARTIME: CURRENT STATE, CHALLENGES, AND PROSPECTS FOR CUSTOM ORTHOPEDIC FOOTWEAR PRODUCTION

Purpose. *The study analyzes the current state of orthopedic footwear manufacturing in Ukraine under conditions of full-scale war, with particular emphasis on the production of bespoke orthopedic footwear. It identifies the key challenges facing the sector and explores potential solutions through the adoption of advanced approaches and digital technologies. The research also investigates pathways for streamlining the design and manufacturing process of customized orthopedic footwear by integrating digital tools and effective collaboration formats with technical laboratories and specialized professionals, illustrated through a practical experimental case.*

Methods. *An analytical review was conducted, including statistical data from rehabilitation centers and orthopedic enterprises, content analysis of regulatory documents and rehabilitation supply programs, as well as a comparative assessment of technologies and costs for manufacturing standard versus custom-made orthopedic footwear. A case study in the form of a practical experiment was undertaken, involving the design and production of orthopedic footwear tailored to the individual needs of a disabled serviceman, utilizing contemporary digital technologies.*

Results. *Amid war and the sharp increase in demand for orthopedic devices, Ukraine's orthopedic sector has faced a reduction in the number of operating enterprises due to destruction, alongside a shortage of skilled personnel caused by migration and limited educational programs. It was determined that only around 20 % of orthopedic-oriented enterprises in Ukraine produce footwear on a bespoke basis. A series of systemic problems were identified and analyzed, revealing barriers that hinder the sector's performance and limit patient access to orthopedic products.*

Within the framework of the case study, adaptive boots were designed for use in the rehabilitative and post-rehabilitation phases of treatment for an injured serviceman. These models were developed in accordance with modern biomechanical principles and individualized last construction. The footwear was produced through a collaborative format involving a research and technical laboratory employing digital tools, a footwear manufacturing facility equipped with shoemaking machinery, and expert medical consultation.

Scientific novelty. *For the first time, a comprehensive analysis was carried out covering the technological, economic, and organizational aspects of enterprises specializing in the production of bespoke orthopedic footwear. A collaborative*

model was proposed, linking existing manufacturing facilities with orthopedic centers and research laboratories by introducing new stages into the production workflow, thereby enhancing the efficiency of custom orthopedic footwear manufacturing. A case study of the design and production process was conducted in a cross-structural collaboration format, demonstrated through the practical experiment of producing custom-made rehabilitation footwear for a patient recovering from injury.

Practical significance. *The analysis of the orthopedic footwear manufacturing sector revealed a set of problems that can be addressed through optimization of production algorithms, adoption of cutting-edge technologies, and engagement of skilled specialists. These measures will establish the foundation for a competitive and resilient sector capable of promptly responding to contemporary challenges and patient needs. The study provides recommendations for optimizing the production process of orthopedic footwear through the efficient use of existing manufacturing capacities, integration of external structures at preparatory stages, and application of digital equipment to refine production workflows and improve the quality of orthopedic products.*

Key words: *orthopedic footwear, rehabilitation, 3D printing, custom-made order.*

Постановка проблеми

Війна в Україні стала серйозним випробуванням для всієї системи охорони здоров'я країни, і ортопедична галузь не є винятком. Повномасштабні бойові дії призвели до значного збільшення кількості поранень, травм та ампутацій кінцівок як серед військових, так і цивільного населення. Відповідно різко зріс попит на ортопедичні вироби – протези верхніх та нижніх кінцівок, ортези, спеціальне реабілітаційне приладдя та ортопедичне взуття. Одночасно війна спричинила руйнування виробничих потужностей, перебої в постачанні сировини і матеріалів, а також вимушену міграцію кваліфікованих фахівців за кордон чи в інші регіони. Сукупність цих факторів створила безпрецедентні виклики для галузі, яка й до того стикалася з низкою проблем розвитку [1–2].

На сьогодні в Україні функціонують 73 центри протезування та ортезування верхніх і нижніх кінцівок, розташовані в різних регіонах країни. Основними видами травм, з якими працюють дані заклади, є ампутації кінцівок різного рівня та тяжкі нейротравми, що потребують правильного ортопедичного лікування та виготовлення індивідуального ортопедичного взуття для забезпечення повноцінної реабілітації пацієнтів. Водночас, незважаючи на велику кількість підприємств протезно-ортопедичного профілю, лише 20 % з них здійснює повний цикл індивідуального виготовлення ортопедичного взуття будь-якої складності із застосуванням сучасних CAD/CAM-технологій. До даних виробництв відноситься виробництво «Теллус» (м. Одеса), де завдяки цифровому 3D-моделюванню стопи та автоматизованому виготовленню колодок і устілок досягається висока точність анатомічного прилягання взуття, персоналізація конструкції та якісний функціональний результат. Ортопедичне виробництво «Теллус» поєднує новітні технології з багаторічним досвідом майстрів, що дозволяє підвищувати комфорт і якість життя пацієнтів та відповідати світовим стандартам ортопедії. Даний приклад демонструє можливості цифровізації, проте більшість інших вітчизняних виробництв поки що працюють за традиційними технологіями і не мають таких потужностей (табл. 1).

Таблиця 1

Виробники ортопедичних виробів в Україні

Виготовлення ортопедичного взуття	Виготовлення ортопедичного взуття на індивідуальне замовлення
Чоловічі: Теллус (м. Одеса), Ортопрофі (м. Львів), OLVI (м. Одеса), ПП «Форвард Орто» (м. Львів), Центр «Опора-плюс» (м. Харків),	Теллус (м. Одеса), Ортекс (Закарпатська обл.), Всеукраїнський центр «ЗДОРОВ'Я» (м. Київ)
Жіночі: Теллус (м. Одеса), Ортопрофі (м. Львів), OLVI (м.Одеса), ПП «Форвард Орто» (м. Львів), Центр «Опора-плюс» (м. Харків).	Теллус (м. Одеса), Ортекс (Закарпатська обл.), Всеукраїнський центр «ЗДОРОВ'Я» (м. Київ)
Дитячі: Теллус (м. Одеса), Ортопрофі (м. Львів), Bottemarket (м. Рівне), VIKRAM, Kena (м. Суми), OLVI (м. Одеса), ПП «Форвард Орто» (м. Львів), Max Baby Shop (м. Львів), «АРОЛ ПЛЮС» (м. Львів), Центр «Опора-плюс» (м. Харків).	Теллус (м. Одеса), Ортекс (Закарпатська обл.), Всеукраїнський центр «ЗДОРОВ'Я» (м. Київ)

Таким чином, актуальним є всебічний аналіз поточного стану ортопедичних виробництв України, особливо в умовах воєнного часу, визначення основних проблем галузі та пошук шляхів їх вирішення. Особливої уваги заслуговує напрям індивідуального виготовлення ортопедичного взуття, оскільки він вимагає поєднання медичних, інженерних та виробничо-технологічних підходів.

В роботі висунуто гіпотезу, що комплексна модернізація ортопедичних виробництв (впровадження цифрових технологій CAD/CAM, 3D-сканування та 3D-друку, використання нових матеріалів, інтеграція медичних і технічних фахівців у міждисциплінарні команди, а також удосконалення системи координації та забезпечення пацієнтів) здатна суттєво підвищити якість, точність та доступність ортопедичних виробів за індивідуальним замовленням. Передбачається, що реалізація таких впроваджень дозволить скоротити час виготовлення ортопедичних виробів, покращити їх анатомічну відповідність та функціональність, а також зменшити бюрократичні бар'єри при забезпеченні пацієнтів засобами реабілітації. Перевірка цієї гіпотези здійснюється шляхом аналізу наявних

проблем і зіставлення їх з потенційними рішеннями, які вже апробовані у світовій практиці або пропонуються до впровадження в Україні [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження ґрунтується на комплексному підході із застосуванням кількісних та якісних методів. Проаналізовано статистику мережі протезно-ортопедичних закладів в Україні, їхню географію та профіль діяльності. З метою оцінки впливу війни на протезно-ортопедичний сектор проведено порівняльний аналіз довоєнних і актуальних показників діяльності за даними Міністерства охорони здоров'я

Здійснено аналіз нормативно-правової бази, державних програм та професійних стандартів у сфері забезпечення осіб з інвалідністю технічними засобами реабілітації [4–5].

Для глибшого розуміння технологічних складностей виробництва проведено експертне спостереження за виготовленням індивідуального ортопедичного взуття на підприємствах. Залучено фахівців-ортопедів і техніків-модельєрів для аналізу етапів від обстеження та зняття мірок до виготовлення колодки, пошиття й фінальної примірки.

Методом контент-аналізу опрацьовано публікації та звіти міжнародних організацій (ВООЗ, Міжнародний Комітет Червоного Хреста, ООН) щодо організації протезно-ортопедичної допомоги в умовах гуманітарних криз [6–7].

Методологія поєднує статистичний аналіз, експертні оцінки й порівняльні підходи, що дозволяє дати комплексну оцінку стану галузі та напрямів її модернізації.

Тематичне дослідження шляхів оптимізації процесу виготовлення ортопедичного взуття за індивідуальним замовленням представляє собою практичний експеримент з виготовлення індивідуальної пари ортопедичного взуття згідго потреб пацієнта, що переніс поранення та ушкодження м'яких тканин стопи. Методологія проведення даного дослідження включає етапи 3д антропометричних досліджень стопи безконтактним методом за допомогою спеціалізованого 3д сканера FootIn 3d, 3д моделювання форми колодки в спеціалізованій САПР функціями поверхневого 3д моделювання (використовували PowerShape Rhinoceros), 3д друк зразка колодки технологіїю FDM друку (за допомогою 3д принтера Prusa), 2д проектування лекал верху взуття (використовували програму USM2), виготовлення тестової пари взуття за типовою технологією взуттєвого виробництва (використовували наявне обладнання взуттєвого виробничого цеху).

Викладення основного матеріалу дослідження

Дослідження стану ортопедичного виробництва в Україні, та вплив війни на ортопедичну галузь та інфраструктуру. Повномасштабне вторгнення суттєво збільшило навантаження на ортопедичну галузь України: кількість пацієнтів з бойовими травмами, які потребують протезування та реабілітації, зросла у рази порівняно з довоєнним періодом. Серед основних проблем – ампутації, складні поранення нижніх кінцівок, хребта, тяжкі переломи та наслідки іммобілізації, що вимагають комплексної реабілітації й спеціального ортопедичного взуття. Водночас більшість ортопедичних центрів зосереджені на протезуванні, а забезпечення взуттям залишається недостатнім. потреб галузі, що підвищує навантаження на наявних спеціалістів і гальмує впровадження нових технологій.



Рис. 1. Найбільш типові поранення, каліцтва та потреби при них

Воєнні дії призвели до втрат інфраструктури галузі: частина підприємств пошкоджена або евакуйована, порушення логістики ускладнило постачання сировини, а економічна криза підвищила собівартість виробництва. Це змусило дрібні майстерні припинити роботу, а великі підприємства – скорочувати асортимент і спрощувати технології. Також гостро відчувається дефіцит кваліфікованих фахівців, оскільки частина спеціалістів мобілізована, виїхала або працює в міжнародних проєктах. Підготовка нових кадрів ускладнена, оскільки спеціалізовані освітні програми обмежені. Професійний стандарт «Протезист-ортезист» затверджено лише у 2023 році (4); наразі йому відповідають лише 14 фахівців, ще 26 навчаються. Цього недостатньо для покриття [8–9].

Таблиця 2

Вплив війни на ортопедичну галузь в Україні

Категорія впливу	Основні наслідки
Зміна попиту	– Значне зростання кількості пацієнтів з ампутаціями, переломами, пораненнями. – Додаткове навантаження на медичні ресурси. – Потреба охоплює як військових, так і цивільних постраждалих від обстрілів. – Зростає потреба в довгостроковій реабілітації.
Перебої в постачанні	– Руйнування логістичних ланцюгів постачання матеріалів. – Проблеми з транспортуванням через інфраструктурні пошкодження, блокпости, бойові дії. – Затримки у виробництві та доставленні ортопедичних виробів. – Зростання вартості виробництва та зменшення доступності для населення.
Вимушена міграція	– Втрата кваліфікованих кадрів (протезисти, хірурги, фізіотерапевти). – Серйозна нестача фахівців у постраждалих регіонах. – Зниження якості медичних послуг та ускладнення реабілітаційного процесу. – Знищення або пошкодження освітніх закладів, що готували медичних спеціалістів.

Проблеми та виклики галузі. Ще до війни протезно-ортопедична галузь України мала низку проблем, а воєнні дії їх суттєво загострили. Нижче узагальнено ключові виклики, з якими сьогодні стикається галузь:

Перебої виробництва: Руйнування та евакуація підприємств порушили виробничі ланцюги, замовлення виконуються із затримками. Дефіцит сировини змушує використовувати альтернативні матеріали чи спрощувати конструкції, що може знижувати якість виробів.

Ресурсний дефіцит: Війна спричинила нестачу якісних матеріалів та подорожчання імпорту, локальне виробництво не задовольняє попит. Багато обладнання застаріле, що ускладнює точне виготовлення сучасних виробів.

Брак взаємодії фахівців: Виготовлення складних ортопедичних виробів потребує командної роботи лікарів та технічних спеціалістів. Недостатня співпраця між ними призводить до втрати індивідуального підходу, особливо у складних випадках. Впровадження клінічних протезистів-ортезистів, які поєднують медичні та технічні навички, лише починається й потребує підтримки.

Зростання кількості тяжких травм виявило недостатню спроможність реабілітаційної системи. Бракує сучасних центрів, пацієнти отримують допомогу розрізнено, а затримки у виготовленні виробів уповільнюють відновлення (табл. 3) [10].

Таблиця 3

Проблеми у взаємодії окремих компонентів процесу виготовлення ортопедичного взуття

Проблема	Суть проблеми	Наслідки
Невідповідність між медичним призначенням і технічним виконанням	Майстер не завжди правильно інтерпретує медичні висновки ортопеда або не має достатніх знань для його реалізації у виробі	Взуття не вирішує проблему або погіршує стан пацієнта
Втрата інформації на етапі комунікації	Важливі клінічні деталі можуть бути втрачені або передані некоректно	Зниження індивідуалізації взуття та його ефективності
Затримки у виготовленні та адаптації	Відсутність прямої взаємодії між фахівцями призводить до затягування процесу погоджень та корекцій	Уповільнення реабілітації пацієнта
Відсутність зворотного зв'язку	Майстер не отримує даних про реакцію пацієнта на взуття	Неможливість своєчасної корекції та оптимізації конструкції
Невизначеність відповідальності	В разі ускладнень важко встановити, хто винен – лікар чи виробник	Складність вирішення проблеми невідповідного взуття

Виробництво ортопедичного взуття за індивідуальним замовленням. Індивідуальне ортопедичне взуття в Україні виготовляється як у державному, так і в приватному секторах, проте його частка відносно загального обсягу протезно-ортопедичних виробів є невеликою. На даних виробництвах найчастіше застосовуються традиційні методи: вручну моделюється дерев'яна або гіпсова колодка під форму стопи пацієнта, верх взуття кроїться і відшивається майстрами вручну з натуральної шкіри, підошва формується з гуми чи поліуретану стандартним методом приклеювання. На відміну від масового фабричного взуття, кожна пара індивідуального взуття виготовляється фактично як ексклюзивний виріб, тому процес потребує багато часу, високої кваліфікації персоналу і достатнього матеріально-технічного оснащення.

Війна загострила проблеми, що існують у секторі індивідуального ортопедичного взуття. Відчувається дефіцит якісної сировини, особливо натуральної шкіри, через зниження виробництва в Україні й ускладнений імпорт. Вартість матеріалів зросла, підвищуючи собівартість виробів. Гостро бракує й кадрів – ортопедичних шевців і техніків-модельєрів, які традиційно навчалися на виробництвах. Через складність процесу розробки індивідуального ортопедичного взуття та необхідність залучення різних фахівців (табл. 4) спеціалісти, що нині працюють на підприємствах України, перевантажені замовленнями.

Таблиця 4

Етапи виготовлення індивідуального ортопедичного взуття

Етап	Детальний опис	Технології / обладнання	Фахівці
1.Обстеження стопи	Визначаються особливості анатомії стопи: плоскостопість, подовженість/вкорочення, асиметрія, патологічні навантаження, деформації (вальгус, варус, hallux valgus тощо)	Плантографія – фіксація зони опори стопи. 3D-сканування – цифрова модель стопи. Комп'ютерна тензометрія – аналіз розподілу навантаження під час стояння/ходьби	Ортопед, реабілітолог
2.Отримання вихідної інформації для створення колодки	Вимірюються довжина, ширина, об'єми, підйом стопи. Створюється гіпсова або 3D-друкована колодка, яка повторює контури стопи клієнта	Ручне гіпсування або цифрове 3D-моделювання. Виготовлення або адаптація колодки вручну/на ЧПК-верстаті	Модельєр колодок та оснастки, CAD-оператор
3.Моделювання конструкції взуття	Визначається тип взуття (чобітки, туфлі, сандалі), висота, тип застібки (еластична вставка, велкро), корекційні елементи (бокові укріплення, фіксатори п'яти, жорсткий задник). Створюється креслення верху та комплект лекал	Програмне моделювання (CAD/CAM). Розробка шаблонів вручну або за допомогою плотерів	Модельєр-дизайнер взуття
4.Виготовлення ортопедичної устілки	Формуються устілки з індивідуальними вставками: супінаторами, коректорами поздовжнього/ поперечного склепіння. Устілка часто є ключовим елементом ортопедичного ефекту	Термопреси. Шліфувальні та вирізні верстати. Формувальні установки	Майстер з виготовлення устілок
5.Розкрій деталей та збирання заготовки взуття	По створених шаблонах викроюється верх взуття з урахуванням анатомічної будови. Використовується м'яка або жорстка натуральна шкіра, тканини, що дихають, підкладкові матеріали	Ножі-матриці (висікання), лазерні різаки, швейні машини. Натуральна шкіра, мікрофібра, текстиль, піноматеріали.	Розкрійник, майстер з збирання заготовок взуття
6.Складання взуття	Верх зшивається, формуються елементи взуття (задник, язичок, бокові частини), проводиться затяжка на колодку, приклеювання або пришивання підошви	Затяжні машини. Преси для підклеювання. Машини для прикріплення підошви (пришивання, пресування)	Майстер з пошиву заготовок, майстер із складання взуття
7.Примірка, корекція та завершальна обробка	Здійснюється примірка, визначається комфортність, перевіряється відсутність тиску, коригується жорсткість або положення устілки. Завершальне шліфування, обробка швів, нанесення логотипа		Ортопед, реабілітолог

Держава забезпечує осіб з інвалідністю ортопедичним взуттям у певних обсягах залежно від віку. Дорослі з інвалідністю мають право отримати до двох пар ортопедичного взуття на рік. Діти з інвалідністю віком до 7 років забезпечуються двома парами взуття кожні 6 місяців, а діти віком від 7 до 18 років – двома парами кожні 8 місяців [11–12]. Таблиця 5 демонструє граничну вартість ортопедичного взуття, що компенсується з державного бюджету.

Таблиця 5

Граничні ціни на ортопедичне взуття (2025 рік)

Категорія взуття	Гранична ціна (грн)
Взуття для компенсації укорочення нижньої кінцівки (до 30 мм) (К6)	4 275
Взуття для компенсації укорочення нижньої кінцівки (30–60 мм) (К7)	4 479
Взуття для компенсації укорочення нижньої кінцівки (60–90 мм) (К8)	4 399
Взуття для компенсації укорочення нижньої кінцівки (90–120 мм) (К9)	4 426
Взуття для компенсації укорочення нижньої кінцівки (120–150 мм) (К10)	4 586
Взуття за наявності фіксованих деформацій стопи (К14)	2 614
Взуття за наявності фіксованих деформацій стопи з шинами (К14)	5 781
Взуття на «діабетичну стопу» з ортезами на стопу (К15)	1 725
Взуття за наявності часткової ампутації стопи (К16)	1 723
Взуття з одностороннім берцем або з вбудованим ортезом (К17)	1 769
Взуття з двостороннім берцем або з вбудованим ортезом (К18)	1 781
Взуття з двостороннім берцем або з вбудованим ортезом з шинами (К18)	4 826
Ортопедичне взуття з індивідуальним копилом, виготовлене за 3D-технологією із застосуванням CAD/CAM-систем	4 698

В роботі зібрано дані про ринкові ціни декількох моделей серійного ортопедичного взуття вітчизняного виробництва та середню ціну індивідуального замовлення в ортопедичних майстернях. Отримані результати зведено у графік (рис. 2),

Графік демонструє такі ключові моменти:

Стандартне ортопедичне взуття зазвичай має нижчу ціну. Середня ціна такого взуття коливається в межах 1725,00 грн – 5781,00 грн (залежно від моделі, матеріалів, бренду). Індивідуальне ортопедичне замовлення значно дорожче, оскільки включає додаткові послуги: консультацію з ортопедом, проведення замірів, розробку

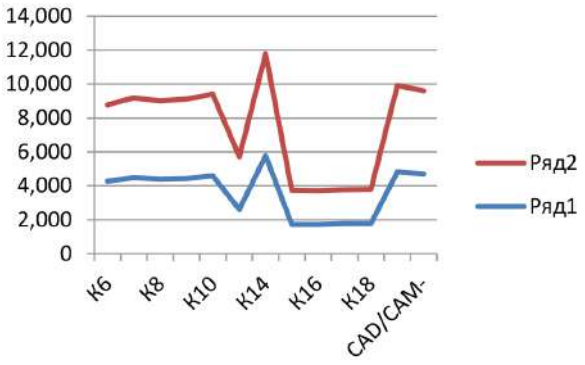


Рис. 2. Порівняння цін на різні види ортопедичного взуття
1 ряд – виготовлення ортопедичного взуття на основі промислових зразків;
2 ряд – виготовлення ортопедичного взуття за індивідуальним замовленням

персональної колодки, виготовлення за спеціальною технологією, а також використання специфічних матеріалів. Середня ціна такого замовлення складає більше 3500,00 грн, а інколи може досягати 12 тис.грн (рис. 2).

Процедура отримання технічних засобів реабілітації (ТЗР) в Україні становить собою досить складний шлях, який складається з багатоканального подання документів, що спрощує доступність, особливо для маломобільних громадян; приділяється значна увага інформуванню заявників про їхні права та можливості; Фонд соціального захисту інвалідів відіграє центральну роль, що сприяє стандартизації процесу; заявник має право вибору підприємства-постачальника; передбачено кілька етапів підписання документів для юридичної чіткості; забезпечується не лише надання ТЗР, але й подальша підтримка [12].

Окремо проаналізовано проблему черг на ортопедичне взуття за соціальними програмами: вивчено повідомлення профільних відомств, звернення громадських організацій щодо середньої тривалості очікування, а також основні причини затримок (дефіцит виробничих потужностей та кваліфікованих кадрів, бюрократія, недофінансування). Недостатня кількість ортопедичних виробництв, які виготовляють продукцію за соціальними програмами, стала причиною ситуації, коли люди з інвалідністю та інші категорії населення, які потребують спеціалізованого взуття, змушені чекати на замовлення від 5 до 7 місяців, а інколи й довше

Частина з окреслених проблем може бути частково усунута за допомогою використання новітніх технологій.

Інновації: Ортопедична галузь постійно розвивається, з'являються нові матеріали, технології та методи лікування. Проте в Україні інвестиції в дослідження й розробки залишаються обмеженими, особливо під час війни. Новітні технології, такі як 3D-друк і комп'ютерне моделювання, дозволяють підвищити якість виробів та ефективність виробничого процесу, а також прискорити виготовлення.

У попередніх дослідженнях було запропоновано метод індивідуалізації ортопедичного взуття із застосуванням цифрових технологій в умовах Українського виробництва. Використання 3D-моделювання та CAD-середовищ дозволяє підвищити точність розроблюваних проектів, уникаючи багаторазових повторних коригувань. Застосування технології 3д друку дозволяє виготовляти цілий комплект персоналізованих елементів ортопедичного взуття, в тому числі для пацієнтів зі складними деформаціями стопи, в межах локального виробництва [13]. Одним з найважливіших факторів забезпечення якості індивідуального ортопедичного взуття є висока точність вихідної інформації про форму стопи, що досягається з використанням 3д сканування. Застосування 3д сканерів дозволяє отримувати та зберігати всю інформацію, необхідну для моделювання основних елементів форми взуття. Викока ефективність таких сучасних підходів досягається шляхом впровадження вдосконалених методів розробки складних ортопедичних форм на основі вихідної антропометричної 3д інформації [14]. Для створення індивідуальних колодок та устілок-компенсаторів була проведена робота, де використовувалися 3D-антропометрія, гіпсування, сканування та методи зворотного інжинірингу [15]. Дані дослідження довели необхідність впровадження іноваційних технологій в сектор розробки індивідуального ортопедичного взуття в Україні.

Інвестиції в інновації критично важливі для забезпечення сучасної ортопедичної допомоги. Попри труднощі, уряд України та міжнародні організації (ВООЗ, МКЧХ, ООН) мобілізують ресурси для підтримки галузі, надають фінансову й технічну допомогу, навчання фахівців та сприяють впровадженню сучасних технологій у протезуванні та реабілітації. Таблиця 6 демонструє виявлені проблеми роботи сектору та перспективні шляхи їх вирішення [16–18].

Тематичне дослідження з розробки ортопедичного взуття за індивідуальним замовленням у виробничих умовах із залученням цифрових технологій.

В ході підготовки до дослідження було проаналізовано процес розробки та виготовлення ортопедичного взуття для потреб реабілітації після поранень, оперативних втручань та некласичних часткових ампутацій стопи. Практичний експеримент реалізовувалося на базі лабораторій КНУТД та навчально-виробничих майстерень ВСП «Одеський

Таблиця 6

Основні проблеми, та перспективи розвитку сектору ортопедичного взуття в Україні

Проблема / Виклик	Суть / Опис
Обмежені виробничі потужності	Недостатньо підприємств для задоволення попиту; частина виробництв пошкоджена або закрита через війну
Складність індивідуального виробництва	Виготовлення взуття потребує індивідуального підходу, кваліфікованих фахівців, спеціального обладнання; процес повільний і трудомісткий
Бюрократичні перешкоди	Процедура отримання взуття складна й тривала, вимагає багато документів, проходження комісій, очікування фінансування
Недостатнє фінансування	Державних коштів не вистачає для покриття потреб; виробники не мають ресурсу для розширення виробництва, виникають черги
Проблема черг	Довге очікування призводить до погіршення стану здоров'я, обмеження мобільності, зниження якості життя
Шляхи вирішення та Перспективи розвитку	
Імплементація волонтерських ініціатив	Організації й фонди допомагають коштами, логістикою, психологічною підтримкою, закриваючи прогалини у держдопомозі
Впровадження ефективних алгоритмів роботи вцілілих виробництв	Цифровізація – використання 3D-сканування, баз даних колод та устілок для прискорення індивідуального проєктування; раціональне використання ресурсів – перехід на локальні матеріали, рециклювання та модульні технології, що знижують витрати; гнучке виробництво – адаптація ліній під різні типи ортопедичних виробів, зменшення залежності від централізованих постачань; колаборація з клініками та реабілітаційними центрами – створення єдиної системи обліку замовлень і цифрових протоколів пацієнтів; контроль якості – стандартизація етапів (скринінг, проєктування, виготовлення, примірка), інтеграція швидких методів перевірки
Перепрофілювання спеціалістів взуттєвих виробництв. З урахуванням актуальних потреб замовників, які мають фізіологічне відхилення в розвитку стоп	Нова орієнтація на потребу конкретного пацієнта, а не стандартний модельний ряд: зараз на першому місці – зручність, адаптованість, мобільність; швидка адаптація до аварійних чи кризових умов: пристосування виробництва до соціальних запитів, які змінюються миттєво (оточення, доступність, обсяги); фокус на функціональність у критичних умовах: легкі, міцні матеріали; простота конструкції; можливість полегшеної обробки й ремонту навіть поза масштабним виробництвом; інтеграція волонтерських та благодійних ініціатив: створення мобільних лабораторій у співпраці з місцевими чи міжнародними фондами, що дозволяє оперативно виготовляти індивідуальні вироби прямо на місці; навчання «на виїзді»: майстри навчаються швидко пристосовувати стандартні моделі, перетворюючи їх на адаптивні, індивідуальні ортези, що максимально відповідають стану пацієнта.
Відновлення профе-сійної освіти ортопедичного напрямку	Модернізація й відновлення системи підготовки кваліфікованих кадрів
Розвиток інновацій	Впровадження 3D-друку, CAD/CAM, біонічних протезів підвищить рівень індивідуалізації й ефективності
Створення профільних науково-технічних лабораторій	Пошук шляхів вирішення задач некласичних деформацій стопи, допомога в реабілітації
Налагодження роботи ортопедичних підприємств, покращення системи реабілітації	Створення мультидисциплінарних центрів із повним спектром послуг сприятиме комплексній підтримці людей з інвалідністю

технічний фаховий коледж ОНТУ». У результаті виготовлено експериментальні зразки взуття, конструктивно-технологічні особливості яких, зокрема підвищена м'якість у носково-пучковій зоні та відсутність тиску на чутливі ділянки стопи, забезпечують зменшення дискомфорту, сприяють загоюванню ран і підвищують ефективність відновлювальних процесів, що підтверджує критичну роль індивідуалізації у виробництві ортопедичних виробів.

Сьогодні за статистикою, більше половини поранень пов'язані із нижніми кінцівками. Мінно-вибухові поранення стоп призводять до операцій, часткових або повних вмпутацій та до тривалого лікувального процесу. Часті випадки інфікування під час отримання травми або супутні осколкові ураження нервово-м'язової тканини стопи затримують період реабілітації.

В роботі розглянуто випадок розробки індивідуального взуття для пацієнта після мінно-вибухового поранення переднього відділу стопи. Основною задачею майстрів стало створення моделей військових черевиків, які б не лише забезпечували захист і функціональність, а й враховували специфічні потреби осіб із травмами стопи, зокрема у носково-пучковій зоні. Однією з ключових інновацій конструкції стало застосування у носковій частині спеціальних амортизувальних матеріалів, а саме підносків із пінополіпропілену товщиною 4 мм, який завдяки низькій щільності, високим амортизаційним властивостям і здатності до енергопоглинання при локальному тиску забезпечує стабільність та збереження форми носкової частини взуття навіть при значному зовнішньому впливі, водночас мінімізуючи ризик компресії в ділянці травмованих пучків стопи (рис. 3). Додаткова індивідуальна ортопедична устілка із матеріалу Ева сприяє рівномірному розподілу навантаження по площині підошви, зменшує больові відчуття й покращує біомеханіку стопи. З метою підвищення функціональних властивостей у конструкції передбачено використання аналогічного пінополіпропілену товщиною 8 мм, інтегрованої у верхню частину берців, що забезпечує делікатну, але надійну підтримку стопи – особливо актуальну для осіб із наслідками переломів, забоїв або після хірургічних втручань, а також створює додатковий шар демпфування, який поглинає удари при ходьбі, знижує пікові навантаження на пошкоджені ділянки стопи й опорно-рухового апарату в цілому та зменшує точковий тиск на чутливі зони.

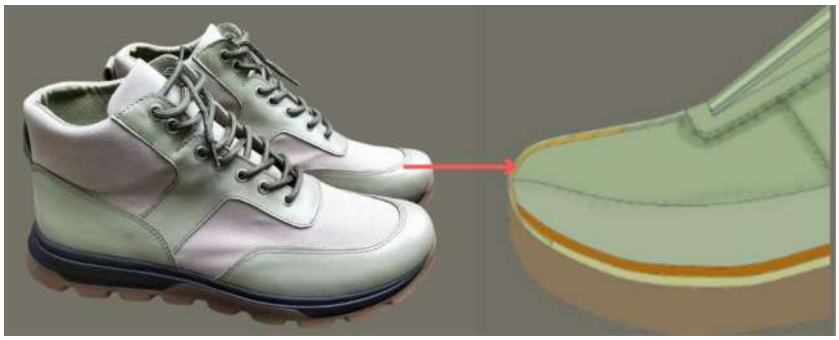


Рис. 3. Адаптивні військові черевики для реабілітації осіб із травмами стопи Зліва – готові черевики. Справа – схема носково-пучкової частини моделі з вказанням розміщення амортизуючої деталі

Процес розробки та виготовлення ортопедичних черевиків включав процеси 3д сканування стопи пацієнта, вибір колодки з бази даних, моделювання індивідуальної форми колодки, виготовлення колодки в матеріалі на потужностях підприємства Львів-пласт, розробка та виготовлення устілки на спеціалізованому виробництві на основі цифрових результатів сканування стопи, розробка лекал верху, виготовлення заготовки верху, затяжка взуття на колодку та приклеювання підошви (рис. 4).



Рис. 4. Етапи виробництва ортопедичного взуття за індивідуальним замовленням

Використання вдосконалених підходів та високоякісних матеріалів позитивно впливає на динаміку реабілітації. Інтеграція сучасних амортизувальних матеріалів у конструкцію військових черевиків дозволяє адаптувати взуття до індивідуальних анатомо-фізіологічних особливостей військовослужбовця у післятравматичний період, сприяючи не лише механічному захисту та стабілізації, а й формуванню правильної біомеханіки ходьби, що важливо для попередження вторинних деформацій та хронічних больових синдромів. Поєднання жорстких і м'яких зон у моделі сприяє зменшенню локальних перевантажень, підвищує стійкість і комфорт при ходьбі, а також дозволяє уникати додаткового травмування уразливої носково-пучкової частини стопи, що, своєю чергу, позитивно впливає на строки й ефективність відновлення функції нижніх кінцівок, рівень фізичної активності та якість життя військовослужбовців у після реабілітаційний період.

Водночас результати дослідження засвідчують, що виготовлення ортопедичного взуття за індивідуальним замовленням сьогодні є надзвичайно актуальним напрямом, однак наявних майстерень, виробництв та спеціалізованих лабораторій явно недостатньо для задоволення всіх потреб населення з обмеженими можливостями. Саме тому особливого значення набуває впровадження цифрових технологій, адже вони є визначальним чинником у процесі проєктування та виготовлення взуття на індивідуальне замовлення. Використання цифрового способу отримання вихідної антропометричної інформації та наявність цифрової бази колодок дало можливість дистанційно здійснювати моделювання, оперативно вносити необхідні зміни та передавати готові дані безпосередньо на виробництва, що дозволило суттєво скоротити строки виготовлення та оптимізувати виробничий цикл.

В роботі вперше було запропоновано модель співпраці, що передбачає залучення робочих взуттєвих підприємств до виготовлення ортопедичного взуття за індивідуальними замовленнями. Це дало змогу поєднати потенціал традиційного виробництва з потребами сучасної реабілітаційної ортопедії, підвищивши якість, доступність

і ефективність продукції. Такий підхід зменшує навантаження на ортопедичні центри, забезпечує своєчасне отримання взуття пацієнтами й формує новий формат взаємодії за принципом ring-системи, що об'єднує ортопедів, реабілітаційні заклади та виробничі цехи.

На цій основі вибудовується алгоритм, який інтегрує клінічний скринінг, цифрову фіксацію даних (3D-сканування, бароподометрія, аналіз ходи), віддалене 3д моделювання колодок та 2д проектування лекал, а також паралельну організацію виробництва ортопедичних елементів і базових конструкцій. Виготовлення взуття відбувається в умовах взуттєвого виробництва. Готове взуття супроводжується рекомендаціями. Запропонована модель дозволяє скоротити час виготовлення завдяки паралельній роботі ділянок виробництва та віддаленому конструюванню, знизити собівартість шляхом повторного використання цифрових активів і мінімізації перероблення, а також забезпечити зайнятість діючих цехів шляхом інтеграції індивідуальних замовлень у виробничий графік між серійними партіями. Одночасно цифровий паспорт виробу та вимірювані клінічні метрики забезпечують високу якість і відтворюваність результатів. Усе це створює баланс між індивідуалізацією ортопедичних виробів та промисловою оптимізацією, закладаючи основу для модернізації галузі у сучасних умовах (табл. 7, рис. 5).

Таблиця 7

Алгоритм роботи виробництва ортопедичного взуття на індивідуальне замовлення

Етап	Дії	Результат	База проведення
1. Ініціація замовлення та клінічний скринінг	Реєстрація замовлення. Первинна оцінка лікарем (анамнез, ризики, фаза загоєння). Визначення клінічної мети (розвантаження, корекція, компенсація)	Протокол скринінгу та первинні рекомендації до конструкції	Центр «Superhumans Center»
2. Цифрове дослідження та формування ТЗ	3D-скан стоп, бароподометрія. Параметризація: довжини, обхвати, висоти арок, асиметрія, зони тиску. Формування узгодженого ТЗ.	Пакет даних у репозиторії.	Центр «Superhumans Center»
3. 3D дизайн колодки, ортопедичних елементів	Вибір цифрової колодки. Розроб-ка індивідуальної колодки. Розробка моделі ортопедичної устілки	3D модель колодки.	КНУТД
проектування лекал,	2д проектування лекал верху	Цифрова модель лекал	Модельєр, віддалена робота
4. Планування паралельного виготовлення (ring-система)	Декомпозиція виробу: – Гілка А: ортопедичні елементи. – Гілка В: верх, крій, затяжка. Призначення виконавців	Єдина «карта виробу», план-графік	«Ортопрофі»; Коледж ВСП ОТФК ОНТУ
	Виготовлення ортопедичної колодки (CNC/3D-друк).	Колодка індивідуальна ортопедична	Львів-Пласт
5. Виготовлення ортопедичних елементів **(Гілка А)**	CAM-підготовка, виготовлення устілок/ортезів (CNC/3D-друк). Виготовлення амортизуючих модулів (ППЕ/ЕВА). Маркування, контроль якості.	Виготовлені компоненти ортопедичного взуття	Спеціалізоване підприємство з виготовлення ортезів\протезів «Ортопрофі»
6. Виготовлення верху та базової конструкції **(Гілка Б)**	Розкрій матеріалів. Збирання верху, вставка фурнітури. Затягування тимчасове для попередньої примірки.	Напівфабрикат Б, готовий до інтеграції з А.	Виробнича дільниця, Коледж ВСП ОТФК ОНТУ
7. Примірка 1, корекція	Стикування гілок А та Б, примірка (клініка/ лабораторія). Бароподометрія/in-shoe сенсори, аналіз тиску. Корекції: шліфування, зміна клинів, жорсткостей.	Тестове взуття із задовільним результатом корекції\ фіксації стопи, що забез-печує потрібну біомеханіку	Центр «Superhumans Center»
8. Фінальна збірка та валідація	Фіксація підошви. Фінальний контроль (геометрія, адгезія, візуальний контроль). Оформлення цифрового паспорта виробу.	Готова пара та цифровий паспорт	Виробнича дільниця, Коледж ОНТУ
9. Видача, інструктаж та супровід	Видача, навчання носінню й догляду. План follow-up (2–4 тиж., 3 міс., 6 міс.).	Пацієнт забезпе-чений взуттям та програмою спостереження	

Коментарі до Алгоритму:

Пацієнт – військовослужбовець, чоловік, 37 років. В анамнезі – хронічне перевантаження опорно-рухового апарату під час служби. Отримав мінно-вибухове поранення переднього відділу стопи (носково-пучкова частина) з руйнуванням м'яких тканин, частковим ураженням плюсне фалангових суглобів, дефектом шкіри з рубцевими змінами та порушенням опорної функції при ходьбі. Загальний медичний огляд проведено у реабілітаційному центрі «Superhumans Center». 3D-сканування та розробку колодки виконано в 3д лабораторії КНУТД; фізичну колодку виготовлено на заводі Львів-Пласт; ортопедичну устілку виготовлено на підприємстві «Ортопрофі»;

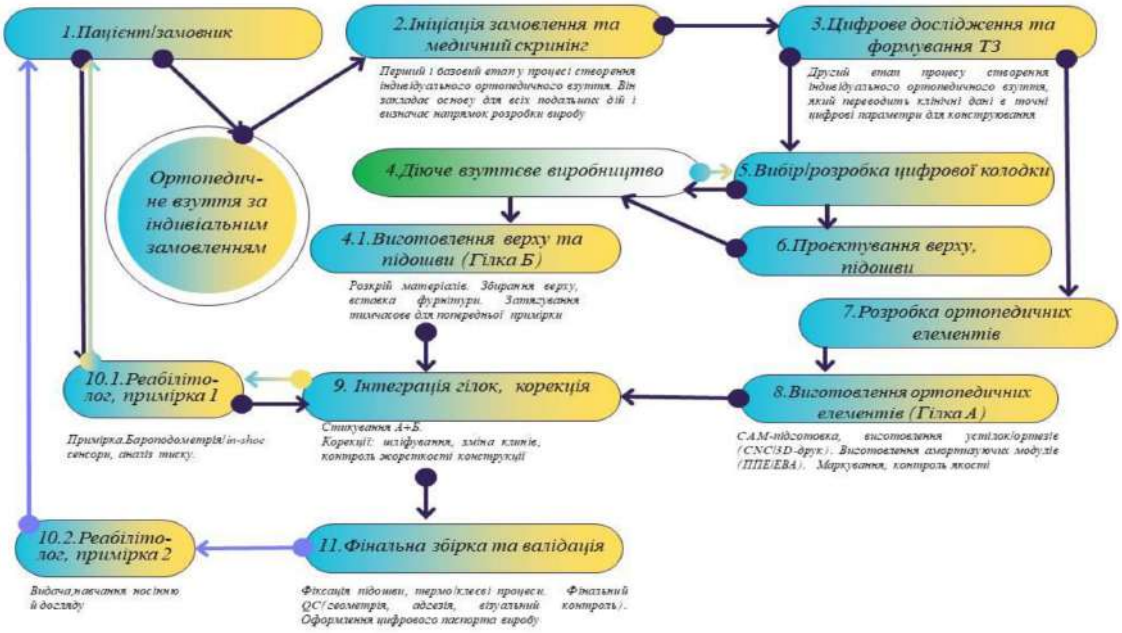


Рис. 5. Алгоритм процесу розробки та виготовлення індивідуального ортопедичного взуття в форматі ефективної взаємодії окремих структур

лекала верху розроблено у ВСП «Одеський технічний фаховий коледж ОНТУ». Пошив і збирання взуття здійснено на діючому взуттєвому виробництві.

Цифровий формат вихідних даних та проектних робіт дозволяє паралельне виконання багатьох етапів процесу, що суттєво скорочує час виготовлення. Залучення спеціалізованих вузькопрофільних фахівців допомагає досягти високої якості взуття з урахуванням індивідуальних вимог пацієнта а також зниження собівартості.

Висновки. Результати дослідження підтвердили, що успішний розвиток протезно-ортопедичної допомоги в Україні напряму залежить від індивідуального виготовлення виробів з урахуванням потреб конкретного пацієнта. Саме персоналізація виробів дозволяє досягти максимальної функціональності, комфорту та якості життя людей з обмеженими можливостями. Використання цифрових технологій (3D-моделювання, база цифрових колодок, CAD/CAM) забезпечує високу точність і скорочує строки виготовлення, а колаборація з діючими взуттєвими виробництвами дозволяє оперативно задовольняти потреби пацієнтів. Запропонована модель взаємодії за принципом ring-системи створює підґрунтя для модернізації галузі та підвищення доступності якісної протезно-ортопедичної допомоги.

Список використаної літератури

1. Кабінет Міністрів України. (2012, 5 квітня). Постанова № 321 «Про затвердження Порядку забезпечення технічними та іншими засобами реабілітації осіб з інвалідністю, дітей з інвалідністю та інших окремих категорій населення і виплати грошової компенсації вартості за самостійно придбані такі засоби, їх переліку». URL:https://zakon.rada.gov.ua/go/321-2012-п

2. Protez Hub. (2024, 13 вересня). Результати дослідження центрів протезування та ортезування в Україні. URL: https://surl.li/fpixki

3. Міністерство охорони здоров'я України. (n.d.). МОЗ запроваджує систему підготовки протезистів-ортезистів на магістерському рівні, яка відповідатиме Міжнародній стандартній класифікації освіти. URL:https://surl.lu/jzpjpa

4. Міністерство соціальної політики України. (n.d.). Новини. https://www.msp.gov.ua/news/10513.html

5. Кабінет Міністрів України. (2012, 5 квітня). Постанова № 321 «Про затвердження Порядку забезпечення технічними та іншими засобами реабілітації осіб з інвалідністю, дітей з інвалідністю та інших окремих категорій населення і виплати грошової компенсації вартості за самостійно придбані такі засоби, їх переліку». URL:https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/321-2012-п

6. World Health Organization. (2025, липень). WHO's response to health emergencies in Ukraine: Annual overview. WHO.

7. United Nations Sustainable Development Group. (2023–2025). Joint humanitarian activities of UN and ICRC in Ukraine.

8. Міністерство охорони здоров'я України. (n.d.). Розділ «Допоміжні засоби реабілітації». URL:https://moz.gov.ua/uk/dopomizhni-zasobi-reabilitacii

9. Міністерство охорони здоров'я України. (n.d.). Офіційний сайт. URL:https://moz.gov.ua
10. Фонд соціального захисту осіб з інвалідністю. (n.d.). Офіційний сайт. URL:https://ispf.gov.ua
11. Центр надання адміністративних послуг (ЦНАП). (n.d.). Інформація про порядок звернення для отримання ТЗР. URL: https://cnap.gov.ua
12. Закон України. (2020, 3 грудня). «Про реабілітацію у сфері охорони здоров'я» № 1053-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1053-20
13. Chertenko, L., Spahiu, T., Lypskyi, T., & Kaptiurova, D. (2024, 25 жовтня). Prospect use of additive manufacturing for orthopedic footwear. In Proceedings of the 14th International Scientific–Professional Conference "Textile Science and Economy" (pp. 119–124). Zrenjanin, Serbia.
14. Chertenko, L., Kaptiurova, D., & Bondar, O. (2023, 17–18 жовтня). Practical aspects of 3D scanning results application in shoe last design. In Proceedings of 3DBODY.TECH 2023 – 14th International Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies (Paper #28). Lugano, Switzerland. URL: https://doi.org/10.15221/23.28
15. Чертенко, Л., Кернеш, В., & Кузіна, Н. (2024). Індивідуалізація ортопедичного взуття: ключові фактори при проєктуванні. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences, 339(4), 491–496.
16. Ортопед. (n.d.). Ортопедичне взуття. URL : https://tovortoped.com.ua/ua/produkciya/ortopedichne-vzuttya
17. OrtoMed. (n.d.). Ортопедичне взуття та устілки. URL : https://ortomed.com.ua/
18. Advances on mechanical designs for assistive ankle-foot orthoses. (2023). arXiv. URL : https://arxiv.org/abs/2304.10821

References

1. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2012, April 5). Resolution No. 321: On approval of the procedure for providing technical and other means of rehabilitation for persons with disabilities, children with disabilities, and other specific categories of the population, as well as the procedure for paying monetary compensation for self-purchased such means, and their list. URL:https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/321-2012-%D0%BF
2. Protez Hub. (2024, September 13). Results of the study of prosthetics and orthotics centers in Ukraine. URL: https://surl.li/fpixki
3. Ministry of Health of Ukraine. (n.d.). The Ministry of Health introduces a system of prosthetist-orthotist training at the master's level, which will correspond to the International Standard Classification of Education. URL: https://surl.lu/jzpjpa
4. Ministry of Social Policy of Ukraine. (n.d.). News section. URL: https://www.msp.gov.ua/news/10513.html
5. World Health Organization. (2025, July). WHO's response to health emergencies in Ukraine: Annual overview. WHO.
6. United Nations Sustainable Development Group. (2023–2025). Joint humanitarian activities of UN and ICRC in Ukraine.
7. United Nations Sustainable Development Group. Joint humanitarian activities of UN and ICRC in Ukraine. 2023–2025
8. Ministry of Health of Ukraine. (n.d.). Assistive rehabilitation devices. URL: https://moz.gov.ua/uk/dopomizhni-zasobi-reabilitacii
9. Ministry of Health of Ukraine. (n.d.). Official website. URL: https://moz.gov.ua
10. Fund for Social Protection of Persons with Disabilities. (n.d.). Official website. URL: https://ispf.gov.ua
11. Administrative Services Center (CNAP). (n.d.). Information on the procedure for applying to obtain technical rehabilitation means. URL: https://cnap.gov.ua
12. Law of Ukraine. (2020, December 3). On rehabilitation in healthcare (No. 1053-IX). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1053-20
13. Chertenko, L., Spahiu, T., Lypskyi, T., & Kaptiurova, D. (2024, October 25). Prospect use of additive manufacturing for orthopedic footwear. In Proceedings of the 14th International Scientific–Professional Conference "Textile Science and Economy" (pp. 119–124). Zrenjanin, Serbia.
14. Chertenko, L., Kaptiurova, D., & Bondar, O. (2023, October 17–18). Practical aspects of 3D scanning results application in shoe last design. In Proceedings of 3DBODY.TECH 2023 – 14th International Conference and Exhibition on 3D Body Scanning and Processing Technologies (Paper #28). Lugano, Switzerland. URL: https://doi.org/10.15221/23.28
15. Chertenko, L., Kernesh, V., & Kuzina, N. (2024). Individualization of orthopedic footwear: Key factors in design. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 339(4), 491–496.
16. Ortoped. (n.d.). Orthopedic footwear. URL: https://tovortoped.com.ua/ua/produkciya/ortopedichne-vzuttya
17. OrtoMed. (n.d.). Orthopedic footwear and insoles. URL: https://ortomed.com.ua/
18. Advances on mechanical designs for assistive ankle-foot orthoses. (2023). arXiv. URL: https://arxiv.org/abs/2304.10821

Дата першого надходження рукопису до видання: 30.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 664.8.03/.04 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.45

О. В. НЄМІРІЧ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції
Національний університет харчових технологій
ORCID: 0009-0005-3479-1466

Д. Б. РАХМЕТОВ
доктор сільськогосподарських наук, професор,
член-кореспондент Національної академії наук України,
завідувач відділу культурної флори
Національний ботанічний сад імені М. М. Гришка
Національної академії наук
ORCID: 0000-0001-7260-3263

Р. Ю. ДОРОШКЕВИЧ
аспірант кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції
Національний університет харчових технологій
ORCID: 0009-0009-8009-2542

ФІТОХІМІЧНИЙ ПРОФІЛЬ ЛЕТКИХ СПОЛУК НАСІННЯ NIGELLA ТА ЙОГО ЗНАЧЕННЯ ДЛЯ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

У статті представлено результати дослідження фітохімічного профілю летких сполук насіння представників роду Nigella з акцентом на чорнушку посівну (Nigella sativa L.), яка відома своєю цінністю як лікарська та харчова рослина. Чорнушка посівна здавна використовується у народній медицині та харчовій промисловості завдяки унікальному складу біологічно активних компонентів, серед яких особливе місце займає тимохінон – ключова біоактивна сполука ефірної олії з вираженими антиоксидантними, протизапальними та імуномодулюючими властивостями. У науковій літературі зазначається, що якісний і кількісний склад летких компонентів Nigella sativa може варіювати залежно від сорту, умов вирощування та технології обробки сировини, що зумовлює актуальність проведеного дослідження.

Метою роботи було здійснення якісного та кількісного визначення летких речовин насіння чорнушки за допомогою методу газової хроматографії, а також проведення порівняльного аналізу хімічного складу насіння різних видів і сортів роду Nigella. У ході експерименту було ідентифіковано понад 30 летких компонентів, серед яких домінують представники класів моно- та сесквітерпенів, що формують характерний ароматичний та функціональний профіль рослини. Встановлено, що найбільш насичений та різноманітний склад летких сполук притаманний чорнущі посівній сорту «Айсу», яка може розглядатися як перспективний об'єкт подальших досліджень і селекційної роботи.

Отримані результати підтверджують, що насіння Nigella sativa є високоперспективною сировиною для створення нових харчових продуктів функціонального призначення, нутрицевтичних засобів та фармацевтичних препаратів. Висока концентрація біологічно активних речовин в олії чорнушки відкриває можливості для її використання як джерела природних антиоксидантів і ароматичних добавок у харчовій промисловості, а також як складової комплексних лікарських і профілактичних засобів.

Ключові слова: *Nigella sativa, чорнушка посівна, ефірна олія, тимохінон, газова хроматографія, леткі речовини, біоактивні компоненти.*

© Нємірiч О. В., Рахметов Д. Б., Дорошкевич Р. Ю., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

O. V. NEMIRICH
PhD in Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Restaurant
and Ayurvedic Products Technology
National University of Food Technologies
ORCID: 0009-0005-3479-1466

D. B. RAKHMETOV
Doctor of Agricultural Sciences, Professor,
Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Head of the Department of Cultural Flora
M. M. Gryshko National Botanical Garden
of National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0001-7260-3263

R. YU. DOROSHKEVYCH
Postgraduate Student at the Department of Restaurant
and Ayurvedic Products Technology
National University of Food Technologies
ORCID: 0009-0009-8009-2542

PHYTOCHEMICAL PROFILE OF VOLATILE COMPOUNDS OF NIGELLA SEEDS AND ITS SIGNIFICANCE FOR THE FOOD INDUSTRY

The article presents the results of a study on the phytochemical profile of volatile compounds in seeds of the genus Nigella, with particular emphasis on black cumin (Nigella sativa L.), known for its value as a medicinal and food plant. Nigella sativa has long been used in traditional medicine and the food industry due to its unique composition of biologically active substances, among which thymoquinone occupies a special place. Thymoquinone is recognized as the key bioactive compound of the essential oil, exhibiting pronounced antioxidant, anti-inflammatory, and immunomodulatory properties. According to the scientific literature, the qualitative and quantitative composition of volatile constituents in Nigella sativa can vary significantly depending on cultivar, growing conditions, and processing methods, which highlights the relevance of the present research.

The aim of the study was to perform qualitative and quantitative determination of volatile compounds in Nigella seeds using gas chromatography, as well as to carry out a comparative analysis of the chemical composition of seeds from different species and cultivars. More than 30 volatile constituents were identified, with monoterpenes and sesquiterpenes being the dominant groups that form the characteristic aromatic and functional profile of the plant. It was found that the most saturated and diverse volatile composition was characteristic of Nigella sativa cultivar "Aisu," which can be considered a promising object for further investigation and breeding.

The obtained results confirm that Nigella sativa seeds represent a valuable raw material for the development of new functional food products, nutraceuticals, and pharmaceutical preparations. The high concentration of bioactive compounds in black cumin oil provides opportunities for its application as a source of natural antioxidants and aromatic additives in the food industry, as well as a component of complex therapeutic and preventive remedies.

Key words: *Nigella sativa, black cumin, essential oil, thymoquinone, gas chromatography, volatile compounds, bioactive components.*

Постановка проблеми

Харчова промисловість потребують нових джерел природних біоактивних речовин, здатних підвищувати якість і функціональну цінність продукції. Рослини роду Nigella, зокрема чорнушка посівна (Nigella sativa L.), вирізняються високим вмістом ефірної олії та комплексу летких сполук, які зумовлюють її лікувально-профілактичні властивості. Серед них особливу роль відіграє тимохінон, що проявляє антиоксидантну, протизапальну й імуномодулюючу активність.

Попри значну кількість робіт, присвячених дослідженню чорнушки, бракує систематизованих даних щодо якісного й кількісного складу летких компонентів насіння різних сортів. Недостатньо також вивчено, як ці сполуки впливають на формування властивостей харчових продуктів і перспективність використання чорнушки у нутрицевтиці.

Таким чином, актуальною науковою задачею є визначення фітохімічного профілю летких речовин Nigella sativa з метою обґрунтування можливостей її застосування у харчовій промисловості та фармацевтичній практиці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Фітохімічний склад насіння Nigella sativa активно досліджується у харчовій технології та фармакології. Встановлено, що ефірна олія чорнушки є джерелом летких компонентів, серед яких провідним є тимохінон з вираженою антиоксидантною та протизапальною активністю [7]. Також ідентифіковано р-цимен, α- та β-пінен, карвакрол, анетол, сапоніни, стерини та фенольні сполуки [16, 27].

Дослідження показують, що географічне походження та умови вирощування впливають на якісний і кількісний профіль летких речовин [19]. Водночас сучасні публікації підкреслюють перспективи використання чорнушки у створенні нутрицевтиків і функціональних продуктів харчування [6, 28].

Незважаючи на значну кількість наукових робіт, особливості складу летких речовин різних сортів Nigella sativa та їхній вплив на якість харчових продуктів вивчені недостатньо, що обґрунтовує потребу подальших досліджень із застосуванням газової хроматографії.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження провести якісну та кількісну оцінку летких сполук різних видів чорнушки (Nigella) за допомогою газової хроматографії з метою визначення їх хімічного складу, порівняння профілів біологічно активних компонентів та обґрунтування перспектив використання насіння як цінної сировини для харчової, фармацевтичної та нутрицевтичної промисловості.

Викладення основного матеріалу дослідження

Чорнушка [1, 2] (*Nigella* L.) – рід однорічних трав'янистих рослин родини жовтецевих(Ranunculaceae). Відомо близько 20 видів, у тому числі в Україні зустрічається 3 види. Крім того, 2 середземноморські види використовуються як культурні рослини:

Чорнушка посівна (N. sativa L.) використовують як пряність в хлібопекарській промисловості, при квашенні капусти та солінні огірків та кавунів, вона приємного пряного присмаку. Насіння чорнушки містить стероїди: кампестерин, ситостерин, стигмастерин, холестерин, а-спінастерин; алкалоїд нігелін, ефірну олію (0,46–1,4 %), тритерпенові сапоніни, кумарини, тимохінон, фермент ліпазу і жирну олію (30,8–44,2 %), у складі якої є олеїнова (48,76 %), лінолева (37,56 %), міристинова, пальмітинова, стеаринова, ліноленова, ейкозадієнова і петрозелінова кислоти.

Чорнушка дамаська (N. damascena L.) – декоративна рослина, містить ефірну олію яку використовують в парфумерії. В листі цього виду міститься до 430 мг% вітаміну С.

Усі види чорнушок декоративні та відмінні медоноси.

Чорнушка відома своїми лікарськими властивостями. В народній медицині з чорнушки готують чай та застосовують його як сечогінний, жовчогінний, глистогінний, шлунковий засіб. Насіння чорнушки використовують для лікування захворювань шкіри, для підвищення секреції молочних залоз у матерів-годувальниць. Давно було помічено, що ті молоді мами, які вживають чорнушку, мають вдосталь молока, щоб вигодувати немовлят. Добре впливає чорнушка на регуляцію серцевого ритму, уповільнюючи його.

У народній медицині застосовується як протипухлинний засіб. Також відомо, що чорнушка має протирадіаційні властивості.

Найбільш розповсюджені види чорнушки:

- *Nigella arvensis* L. – Чорнушка польова
- *Nigella carpatha* Strid
- *Nigella damascena* L. – Чорнушка дамаська
- *Nigella degenii* Vierh.
- *Nigella elata* Boiss.
- *Nigella fumariifola* Kotschy
- *Nigella glandulifera* Freyn & Sint.
- *Nigella hispanica* L.
- *Nigella latisecta* P.H. Davis
- *Nigella nigellastrum* (L.) Willk.
- *Nigella orientalis* L.
- *Nigella oxypetala* Boiss.
- *Nigella papillosa* G.López
- *Nigella sativa* L. – Чорнушка посівна
- *Nigella segetalis* M.Bieb.
- *Nigella stricta* Strid
- *Nigella ungicularis* (Poir) Spenn.Чорнушка посівна (*Nigella sativa*) [1], або чорнушка сійнар [2], або кмин чорний походить з Південно-Західної Азії та Середземномор'я. У дикому вигляді росте у Середземномор'ї, на Балканському півострові, на Кавказі, у Малій Азії. В Україні росте повсюдно, вирощують на городах і в садах як декоративну та пряну рослину.

Насіння має інсектицидні властивості, його застосовують для захисту одягу від пошкодження міллю.

Ефірна олія придатна в їжу, також вона використовується у миловарінні та парфумерії.

Насіння каліндже має гострий гіркий смак та запах, використовується в основному при виробництві кондитерських виробів та напоїв. Також часто його застосовують як чорний перець, однак перевага чорного кмину в тому, що він не подразнює слизову оболонку шлунку.

Насіння використовують як прянощі при засолюванні огірків, кавунів, квашенні капусти, а також як приправу в кулінарії.

Як спеції традиційно використовується у єгипетській кухні, а також у арабських країнах та в Індії [3].

Насіння містить тригліцериди (до 44 %), глікозид мелантин, ефірну олію (0,8–1,5 %). У листках чорнушки посівної міститься до 0,43 % аскорбінової кислоти.

Ефірна олія являє собою рідину жовтого кольору з гострим пряним запахом. Хімічний склад вивчений недостатньо, ймовірно присутня в ній сполука терпенового ряду – мелантол.

Максимальна поживна цінність чорного кмину пояснюється наявністю в ньому значної кількості рослинного білка, клітковини, мінеральних речовин і вітамінів. Поживний склад, отриманий з різних джерел, показав 20–85 % білка, 38,20 % жиру, 7–94 % клітковини та 31,94 % вуглеводів. Серед різних ідентифікованих амінокислот глутамат, аргінін і аспартат, тоді як цистеїн і 12 метіонін були основними і другорядними амінокислотами відповідно. Насіння чорного кмину також містить значні рівні заліза, міді, цинку, фосфору, кальцію, тіаміну, ніацину, піридоксину та фолієвої кислоти [5]. Крім того, фітохімічні аналізи Nigella sativa показали наявність понад сотні фітокомпонентів, які включають в основному алкалоїди, сапоніни, стерини та ефірну олію, але склад багатьох із них не був хімічно визнаний і не підтверджений біологічно. Насіння Nigella sativa містить 26–34 % нелеткої олії, з яких основними жирними кислотами є лінолева кислота (64,6 %) і пальмітинова кислота (20,4 %). Олія насіння складається з 0,4 %–2,5 % ефірної олії [6]. Серед різних активних компонентів, про які повідомлялося досі, тимохінон, який є основним компонентом ефірної олії, є найбільш біоактивною сполукою та демонструє широкий спектр терапевтичних переваг [7]. У літературі повідомлялося про декілька біоактивних сполук із насіння Nigella sativa, серед них найважливішими біоактивними є тимохінони. Інші основні фітохімічні речовини, про які повідомляється з різних Nigella sativa, включають стерини та сапоніни, фенольні сполуки, алкалоїди, нові ліпідні компоненти та жирні кислоти, а також леткі олії різного складу [8]. Склад ефірної олії (0,4–0,45 %), про який повідомляється в різних дослідженнях, представляє близько сорока різних сполук, серед яких виявлено велику кількість п-цимоллімонен, карвон, тимохінон (TQ), тимогідрохінон (THQ), дитимохінон, карвакрол і β-пінен з різною концентрацією [9, 11]. Кількість найбільш важливого біологічно активного компонента, тимохінону, присутнього в леткій олії, виділеній різними методами екстракції з насіння Nigella sativa, змінювалася в широкому діапазоні: з використанням SC-CO_2 (1,06, 4,07 мг/г) [34] і екстракцією Сокслета (2940,43 мг/кг) [35] та (8,8 мг/г) олії [36]. Склад жирних кислот насіння Nigella sativa (32–40 %), як повідомляється різними авторами, містить в основному лінолеву, ліноленову, олеїнову, пальмітолеїнову, пальмітинову кислоти разом з арахідоновою, 13 ейкозадієновою, стеариновою та міристиновою кислотами [12, 14]. Новий діеноат і два відомих моноефіру разом із новими ліпідами були виділені з неомиленого екстракту насіння, а саме метилнонадека-15,17діеноат, пентилгексадек-12-еноат і пентилпентадек-11-еноат [15]. Фітостероли є важливою частиною раціону людини і набувають все більшого інтересу через їх нутрицевтичну та лікувальну користь у зниженні рівня ліпопротеїнів низької щільності та загального холестерину [16]. Фітостероли також важливі як характерні сполуки для оцінки якості рослинних олій і маркування харчових продуктів. За оцінками різних дослідників, загальний вміст стеролів в олії насіння чорного кмину становить від 18 до 42 % неомиленої речовини. Основними ідентифікованими стеринами були β-ситостерин, кампестерол, стигмастерол і 5-авенастерол [15, 17]. Токофероли демонструють привабливий потенціал поглинання вільних радикалів, які, як вважають, припиняють перекисне окислення ліпідів [18]. Загальний вміст токоферолу в олії чорного кмину в різних кількостях, отриманих з різних джерел, коливався від 9,15 до 27,92 мг/100 г. Серед основних токоферолів, які містяться в насінні чорного кмину, добре відомі α- і γ-токоферол і β-токотрієнол [15].

Чорнушка цінна своїм насінням. Воно має гострий перцевий смак і мускатний запах, оскільки містить у собі ефірні олії [36]. Основними складовими насіння чорнушки є: 15 амінокислот, полісахариди і моносахариди, ненасичені і насичені жирні кислоти (лінолева, олеїнова, стеаринова, пальмітинова), 17 фосфоліпіди, фітостероли (β-ситостерол (48,35–51,92 %), 5-авенастерол, кампестерол, стигмастерол), макроелементи (кальцій, калій, фосфор, натрій), мікроелементи (нікель, марганець, селен, цинк, залізо, мідь), вітаміни E, D, C, групи B (B1, B2, B3, B6, B9), каротиноїди, дубильні речовини, алкалоїди (магнофлорин), токофероли (α-токоферол 1,70–4,12 мг/100 г; β-токоферол 4,90–17,91 мг/100 г, γ-токоферол 0,97–4,51 мг/100 г), флавоноїди, ефірні олії (1,3–4 %), сапоніни, ензими [14, 15].

Олія з насіння чорнушки – це зеленувато-коричнева рідина, яка має гострий пряний аромат, а також для неї є характерним дуже терпкий смак. Цій олії притаманні висока біологічна і поживна цінність, оскільки вона містить понад 100 різних компонентів у своєму складі, половина з них виступає каталізаторами обмінних процесів, які проходять в організмі людини [14].

Основні компоненти хімічного складу олії чорного кмину: від 0,4 до 0,45 % маси насіння чорнушки посівної займає ефірна олія. Вона містить наступні компоненти: тимохінон – 30,6–82,4 %, р-цимен – 13,6–33,8 %; лімонен – 1,6–3,4 %, карвакрол – 1,4–5,1 %, карвон – 2,9 %; 4-терпинеол – 0,6–5,6 %, α-пінен – 2,7–12,2 %, β-пінен – 1,6–3,5 %, t-анетол – 0,2–19,4 %. До того ж у ефірній олії утворюється тимохінгідрон, складовими якого є тимохінон та гідрохінон. Ці сполуки володіють антиоксидантними властивостями [13, 16, 17].

Основна відмінність хімічного складу ефірної олії чорнушки посівної та чорнушки дамаської полягає у тому, що чорнушка дамаська містить алкалоїд дамасценін, який відсутній у чорнушці посівній. У той же час леткий екстракт чорнушки дамаської не містить тимохінону, одного з активних компонентів чорнушки посівної [17].

Вивчення хімічного складу олії чорнушки показало, що вона багата жирними кислотами, перелік яких представлений у таблиці 1. Встановлено також наявність у олії з насіння чорного кмину гліцерину, селінену, бензойної, фенілоцтової, гептадеценової, маргароолеїнової кислот.

Аналізуючи таблицю, слід зазначити, що регіон вирощування значною мірою впливає на жирнокислотний склад насіння чорнушки. Значення певних жирних кислот у різних регіонах значно різняться. Це підтверджує залежність якісного та кількісного складу біоактивних компонентів від ґрунтово-кліматичних умов.

Олія з насіння чорнушки також містить велику кількість фітостеролів. В організмі людині вони беруть участь у синтезі жовчних кислот, гормонів, а також провітаміну D. Фітостероли відомі своєю здатністю зменшувати в крові вміст холестерину та цукру, а також бактерицидною, протизапальною та імуностимулюючою діями. Фітостероли застосовують як складові компонентів різних лікарських препаратів, які призначені для профілактики та лікування серцево-судинних, ендокринних захворювань, захворювань передміхурової залози [14].

Таблиця 1

Жирнокислотний склад олії з насіння чорнушки

Найменування кислоти	Вміст у олії чорного кмину, %						
	Туніс	Іран	Індія	Україна	Болгарія	Туреччина	Марокко
Пальмітинова	17,2 ± 0,15	18,4 ± 0,25	9,68	9,66–13,7	10,60	10,1–12,5	17,1 ± 0,1
Пальмітолеїнова	1,15 ± 0,05	0,78 ± 0,25		4,20	4,20		0,2 ± 0,1
Лінолева	50,31 ± 0,25	49,15 ± 0,06	13,48	56–58,6		40,3–58,9	58,5 ± 0,1
Олеїнова	25,0 ± 0,24	23,7 ± 0,06		3,53–23,7	1,67		23,8 ± 0,1
Стеаринова	2,84 ± 0,08	3,69 ± 0,12		1,4–3,4	1,38	2,6–3,2	2,3 ± 0,1
Бегенова	1,98 ± 0,08	2,60 ± 0,05					
Лауринова				65,70	64,92		
Арахінова				12,02	11,72		
Міристинова				0,45–2,13	1,43	0,1–1,1	1,0 ± 0,1
Пентадеценова				1,34	1,94		
Пентадеканова				0,03	0,14		
Ліноленова				0,18–0,21			0,4 ± 0,1

Олія, отримана з насіння чорнушки, часто використовується в народній медицині країн Азії та Середземномор'я як природній засіб від ряду хвороб та станів, таких як астма, гіпертонія, діабет, запалення, бронхіт, головний біль, екзема, лихоманка, запаморочення та шлунково-кишкові розлади. Дослідження вчених довели, що олія з насіння чорнушки має наступні біоактивні властивості: антибактеріальна, протигрибкова, антиканцерогенна, противиразкова, антигіпертензивна, гепатопротекторна, протизапальна, проти набрякова, жарознижувальна та знеболювальна. Також вона вдало може використовуватися як сечогінний, жовчогінний і антигельмінтний засіб, а також як засіб, що покращує лактацію [17, 21, 22, 28].

Радзієвська І.В. відзначила, що: «Олія N. sativa ефективна проти широкого спектра організмів. Зокрема таких бактерій, як B. cereus, B. subtilis, B. pumilus, S. aureus, S. epidermis, Echerichia coli, Salmonella abony, і патогенних грибків – Candida albicans та багатьох інших». Декілька фабрик випускають олію з насіння чорнушки для споживання в їжу: Amana, EI Baraka, EI Hawag, Tasnim [28]. Також олія чорного кмину є компонентом у багатьох косметичних засобах. Вона використовується у шампунях, масках та оліях для волосся; кремах, скрабах, масках для обличчя, а також у парфумерних композиціях [28].

Таблиця 2

Жирнокислотний склад олії із насіння чорнушки сорту

Назва жирної кислоти	Вміст, %
Пальмітинова	10,95
Пальмітолеїнова	0,10
Стеаринова	2,72
Олеїнова	34,94
Лінолева	46,62
Арахінова	0,65
Ейкозадієнова	4,03

Аналізуючи одержані результати, слід відзначити високий вміст ненасичених жирних кислот: олеїнової (ω-9) і лінолевої (ω-6), за рахунок чого підвищується біологічна цінність чорнушкової олії. Ці та інші цінні речовини, які містяться у насінні чорнушки, дають підставу вважати перспективною цю сировину для отримання корисних харчових та фармацевтичних продуктів. Необхідними є подальші дослідження параметрів одержання олії із вивченого насіння.

Основною метою цього дослідження було проведене дослідження хроматографічних профілів летких сполук у 4 зразках чорнушки: чорнушка польова, чорнушка дамаська, чорнушка посівна, чорнушка посівна сорту Айсу для визначення відмінностей в якісному та кількісному складі.

Матеріали та методи

Зразки та їх приготування. Зразки 4 видів чорнушки розподіляли порціями по 1 г у скляні флакони об'ємом 50 мл, герметично закривали для запобігання втрати летких сполук. Зразки во флаконах витримували на протязі 1 доби при кімнатній температурі.

Якісний та кількісний аналіз летких речовин. Для дослідження хроматографічних профілів летких сполук в зразках чорнушки використовували капілярну газову хроматографію.

Розділення компонентів здійснювали за допомогою стандартної хроматографічної капілярної колонки колонка фірми «Agilent Technologies» HP-5 (нерухома фаза 5%-феніл-95%-поліметилсилоксан), довжина 30 м, внутрішній діаметр 0,32 мм, товщина шару нерухомої фази 0,25 мкм, каталожний № 1909J-413.

Таблиця 3

Умови хроматографічного аналізу

Програмування температури колонок	Від 50 до 250 °С зі швидкістю 3 °С/хв.
Температура детектора ПІД	250 °С
Температура випарника	100 °С
Вхідний тиск газу-носія (азот ОСЧ)	1 атм.
Піддув газу-носія на колонку	30 см^3/хв.
Скидання газу-носія	5 см^3/хв.
Витрата повітря	250 см^3/хв.
Витрата водню	30 см^3/хв.

Умови хроматографічного аналізу наведені в таблиці 3. Об'єм повітря, що хроматографується – 0,5 см^3.

Розрахунок кількісного вмісту компонентів дослідних зразків відбувалося за методом внутрішньої нормалізації із статистичною обробкою даних трьох паралельних дослідів. Масова частка досліджуваних компонентів mR, % розраховувалася як відношення площі піка компонента SR до сумарної площі усіх компонентів. За остаточний результат використовували середнє значення з розрахунком середньоквадратичного відхилення *S*. Рівень

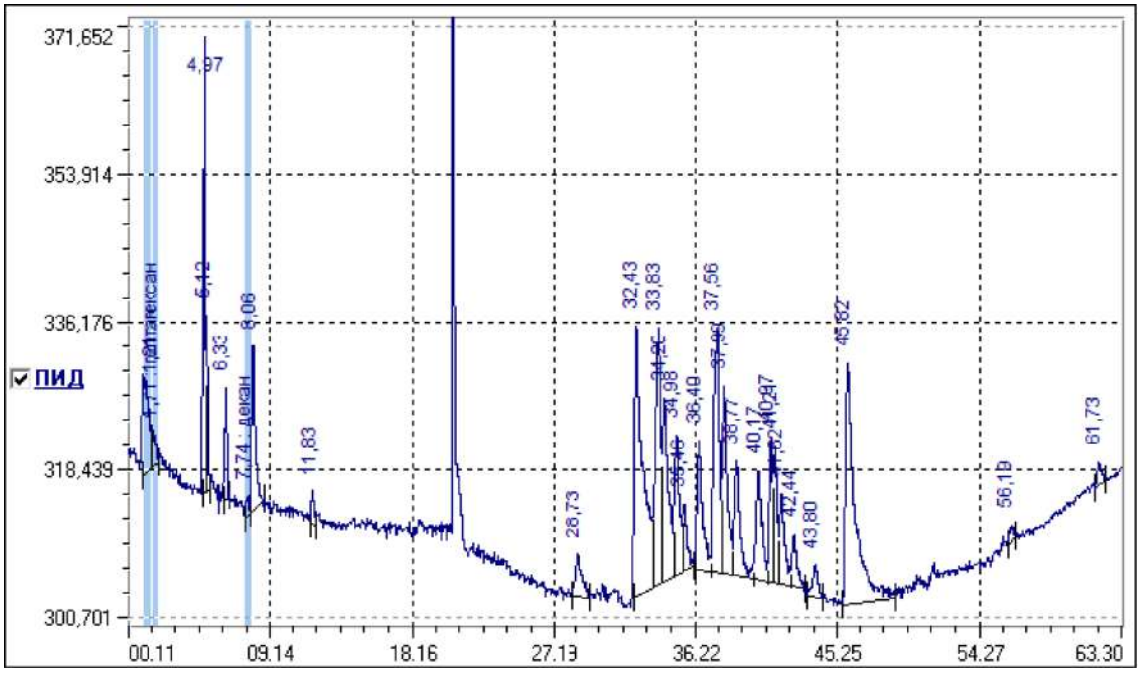


Рис. 1. Хроматограма летких сполук із зразка чорнушки польової

вірогідності за довірчої ймовірності $p = 0,95$ не перевищував $\alpha = 0,05$, критичний критерій Стьюдента = 5,47. За результат бралися середні значення.

Результати

На рисунках 1, 2, 3 та 4 подано хроматограми летких компонентів дослідних зразків насіння чорнушки, які відображають якісний та кількісний склад ефірної олії й дають можливість порівняти профіль основних біоактивних сполук між різними зразками

Ідентифікацію отриманих компонентів здійснювали з урахуванням їх абсолютного часу утримання на хроматографічній колонці, що дозволяло визначати послідовність виходу летких речовин та співставляти отримані результати з наявними довідковими даними. Для більшої достовірності та у випадках, коли суміші летких компонентів містили невідомі речовини або сполуки зі схожими характеристиками, додатково розраховували логарифмічні індекси утримання (індекси Ковача). Цей показник давав змогу підвищити точність ідентифікації, оскільки

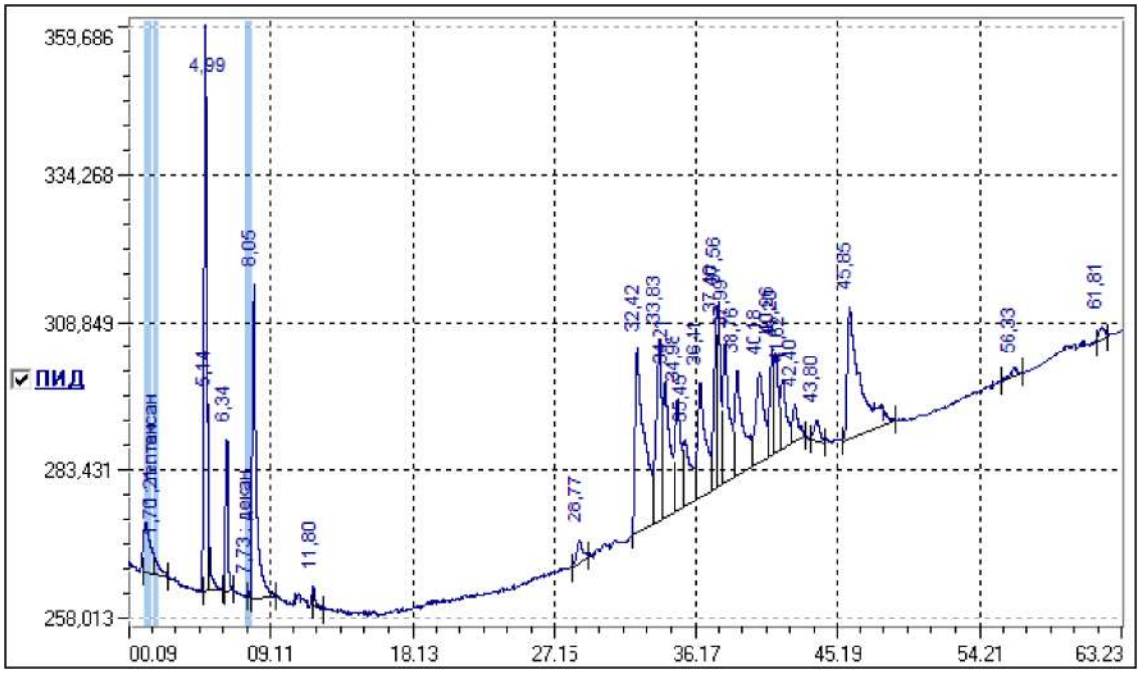


Рис. 2. Хроматограма зразка летких сполук із зразка чорнушки дамаської

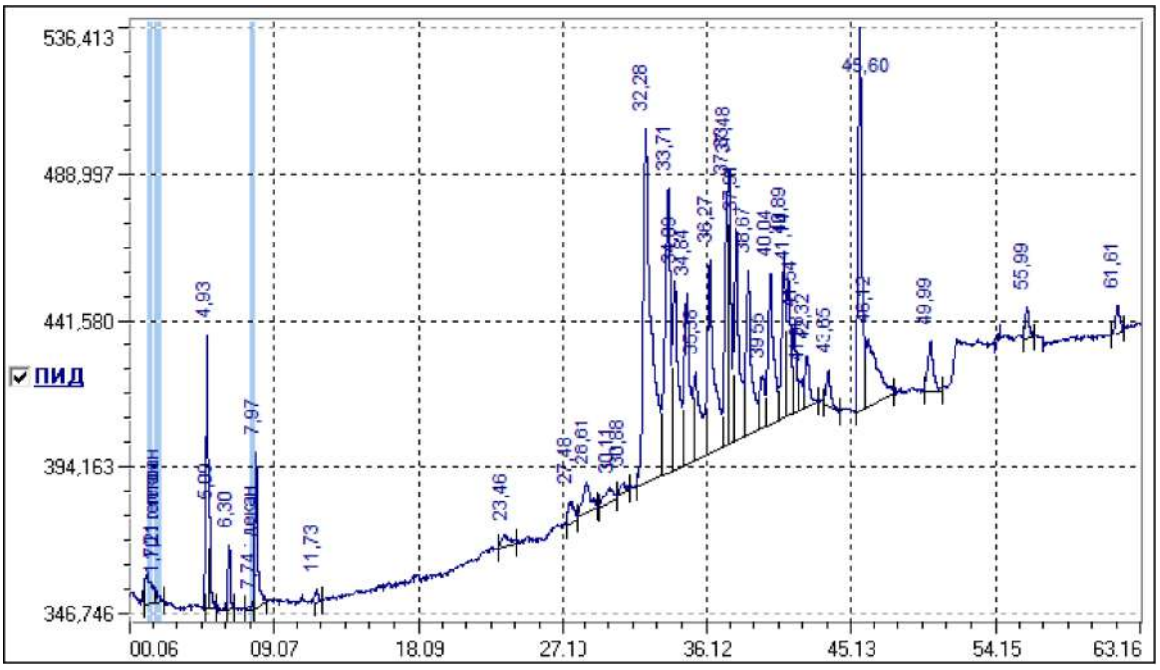


Рис. 3. Хроматограма зразка летких сполук із чорнушки посівної

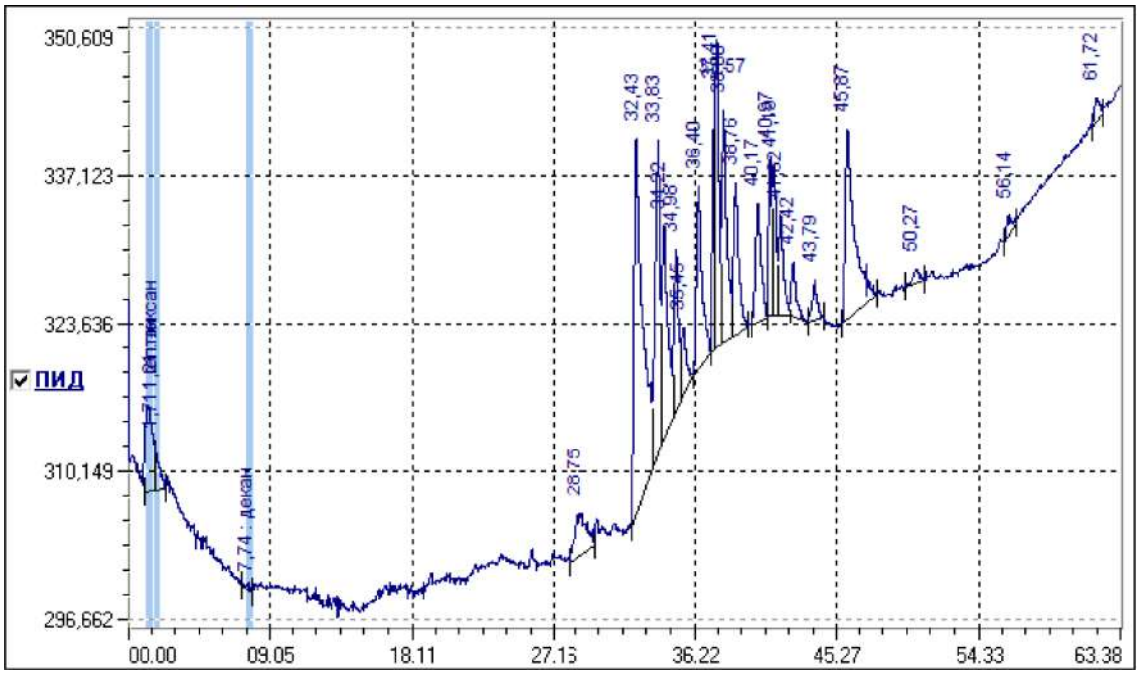


Рис. 4. Хроматограма зразка летких сполук із зразка чорнушки посівної сорту Айсу

Таблиця 4

Ідентифіковані за індексами Ковача леткі компоненти та їх кількісний вміст в дослідних зразках

№	Час утримання, хв.	Компоненти індекс Ковача	Площа піка, % від загальної площі			
			чорнушка польова	чорнушка дамаська	чорнушка посівна	чорнушка посівна, сорт Айсу
1	1,21	Гексан/600	3,5668	2,0612	0,9506	3,2996
2	1,70	Гептан/700	0,9997	0,6798	0,3505	1,4562
3	4,99	913,34	3,8617	5,7157	2,1384	
4	5,14	914,92	1,6159	2,2179	0,8208	
5	6,34	960,83	1,1285	1,8843	0,6243	
6	7,74	Декан/1000	3,5668	0,0590	0,0930	0,1652
7	8,05	1007,82	0,3259	6,7667	1,9076	
8	11,80	1083,44	3,0436	0,3641	0,1488	
9	23,46	1219,11			0,4062	
10	28,77	1259,60	0,4057	0,7606	1,1182	2,6759
11	30,11	1268,40			0,5787	
12	30,88	1273,34			0,2932	
13	32,42	1283,23	1,6051	10,7713	14,7257	18,5050
14	33,83	1291,61	13,5709	6,0731	7,8557	8,6972
15	34,21	1293,85	8,1612	5,8261	5,6535	7,0436
16	34,98	1298,21	6,4080	3,6762	4,5936	4,1080
17	35,45	1300,88	4,0344	3,5214	3,2995	1,9349
18	36,41	1306,16	3,9948	5,5595	6,1938	5,5238
19	37,40	1311,48	3,9948	2,7179	3,3487	3,0920
20	37,56	1312,28	7,9982	4,3889	4,3607	6,3296
21	37,99	1314,56	5,2886	5,5249	5,3016	6,8608
22	38,76	1318,49	3,6538	5,4879	4,3831	4,2581
23	39,55	1322,26			1,3394	
24	40,18	1325,64	3,8085	4,8367	4,0597	3,5669
25	40,96	1329,43	2,6012	2,2245	2,9931	2,6106
26	41,20	1330,59	3,0512	2,5778	2,8796	3,3431
27	41,63	1332,61	2,7025	2,7605	1,6975	2,6200
28	41,98	1334,07			0,5821	
29	42,40	1336,26	1,3744	1,2976	1,0870	1,4666
30	43,80	1342,66	0,8779	0,7248	0,7152	0,9604
31	45,85	1351,72	13,2935	10,6060	6,4921	9,8123
32	50,27	1371,35				0,4643
33	56,33	1392,41	0,3733	0,3800	0,6389	0,5066
34	61,81	1410,76	0,5780	0,5355	0,6103	0,6993

Таблиця 5

Відносна кількість летких речовин в дослідних зразках

№	Час утримання, хв.	Компонент/ індекс Ковача	Площа піка, мВ*хв.			
			чорнушка польова	чорнушка дамаська	чорнушка посівна	чорнушка посівна, сорт Айсу
1	1,21	Гексан/600	4,8866	3,8166	4,0107	3,5252
2	1,70	Гептан/700	1,3696	1,2587	1,4788	1,5558
3	4,99	913,34	5,2906	10,5832	9,0222	
4	5,14	514,92	2,2139	4,1068	3,4630	
5	6,34	960,83	1,5461	3,4891	2,6342	
6	7,74	Декан/1000	0,4465	0,1093	0,3923	0,1765
7	8,05	1007,82	19,690	12,5292	8,0486	
8	11,80	1083,44	3,876	0,6741	0,6280	
9	23,46	1219,11			1,7137	
10	28,77	1259,60	4,992	1,4083	4,7177	2,8589
11	30,11	1268,40			2,4415	
12	30,88	1273,34			1,2369	
13	32,42	1283,23	32,487	19,9443	62,1311	19,7704
14	33,83	1291,61	31,035	11,2450	33,1449	9,2920
15	34,21	1293,85	21,944	10,7877	23,8533	7,5253
16	34,98	1298,21	16,695	6,8069	19,3815	4,3890
17	35,45	1300,88	7,996	6,5203	13,9211	2,0672
18	36,41	1306,16	5,4730	10,2941	26,1330	5,9015
19	37,40	1311,48	5,4730	5,0325	14,1290	3,3034
20	37,56	1312,28	10,9576	8,1266	18,3987	6,7624
21	37,99	1314,56	7,2454	10,2300	22,3685	7,3299
22	38,76	1318,49	5,0058	10,1615	18,4933	4,5493
23	39,55	1322,26			5,6511	
24	40,18	1325,64	5,2178	8,9557	17,1289	3,8109
25	40,96	1329,43	3,5638	4,1189	12,6284	2,7891
26	41,20	1330,59	4,1802	4,7731	12,1496	3,5717
27	41,63	1332,61	3,7024	5,1114	7,1620	2,7991
28	41,98	1334,07			2,4561	
29	42,40	1336,26	1,8830	2,4027	4,5863	1,5669
30	43,80	1342,66	1,2027	1,3420	3,0175	1,0261
31	45,85	1351,72	18,2123	19,6382	27,3917	10,4832
32	50,27	1371,35				0,4960
33	56,33	1392,41	0,5115	0,7035	2,6958	0,5413
34	61,81	1410,76	0,7919	0,9915	2,5748	0,7472

враховував не лише час проходження сполуки через колонку, а й її відносне співвідношення з низкою стандартних вуглеводнів, що є загальноприйнятим методом у хроматографічних дослідженнях.

Таким чином, комбінація аналізу за абсолютним часом утримання та використання індексів Ковача забезпечувала комплексний підхід до визначення якісного складу досліджуваних зразків. Це дозволяло виявити навіть ті компоненти, які були присутні у незначних концентраціях, та забезпечувало високу відтворюваність результатів. Остаточні дані щодо вмісту ідентифікованих речовин у досліджуваних зразках чорнушки наведені в узагальненій таблиці, яка відображає як якісний, так і кількісний профіль летких компонентів.

Досліджувані зразки практично не відрізняються за якісним складом летких речовин, проте мають різний кількісний вміст компонентів, що відображено в Таблиці 5. В ароматі зразків чорнушки польової та чорнушки дамаської виявлено 29 летких речовин ідентичних за складом, в ароматі зразка чорнушки посівної знайдено 33 леткі речовини, чорнушки посівної сорту Айсу представлено 26 летких компоненти. Як можна побачити, в аромат чорнушки посівної більш насичений леткими речовинами за складом та концентрацією компонентів.

Висновки

У результаті проведених досліджень встановлено, що всі досліджувані види чорнушки (Nigella arvensis L., Nigella damascena L., Nigella sativa L. та Nigella sativa L. сорту «Айсу») характеризуються подібним якісним складом летких сполук, проте суттєво відрізняються за їх кількісним вмістом. Газохроматографічний аналіз дозволив ідентифікувати понад тридцять компонентів, серед яких переважають моно- та сесквітерпени, що формують специфічний аромат та визначають біологічну активність насіння.

Встановлено, що найбільш насиченим за кількістю і концентрацією летких речовин є профіль чорнушки посівної, зокрема сорту «Айсу», що підтверджує перспективність його використання у харчовій і фармацевтичній галузях. Порівняння зразків показало відмінності у співвідношенні ключових ароматичних компонентів, що може слугувати критерієм ідентифікації та контролю якості рослинної сировини.

Отримані результати свідчать про значний потенціал насіння чорнушки як джерела біологічно активних сполук із вираженими антиоксидантними, протизапальними та протимікробними властивостями. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію технологій екстракції, визначення стабільності компонентів у різних умовах та оцінку їх функціональних властивостей у складі харчових і фармацевтичних продуктів.

Список використаної літератури

1. USDA GRIN Taxonomy.
2. Кобів Ю. Чорнушка сійна//Словник українських наукових і народних назв судинних рослиню – К. : Наук. думка, 2004. – С. 286.
3. Bharat B Aggarwal. Molecular Targets and Therapeutic Uses of Spices. Google Books. с. 259. ISBN 978-981-4468-95-4
4. Mohammad Hossein Boskabady, Batool Shirmohammadi (2002). Effect of Nigella Sativa on Isolated Guinea Pig Trachea (PDF). Arch. Iran. Med. 5 (2): 103–107.
5. Takruri H. R. H., Dameh M. A. Study of the nutritional value of black cumin seeds (Nigella sativa L.). Journal of the Science of Food and Agriculture. 1998. Vol. 76, Issue 3. P. 404–410.
6. Yimer E. M., Tuem K. B., Karim A., Ur-Rehman N., Anwar F. Nigella sativa L. (Black Cumin): A promising natural remedy for wide range of illnesses. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine. 2019. Vol. 2019. P. 1–16.
7. Ahmad A., Husain A., Mujeeb M., Khan S. A., Najmi A. K., Siddique N. A., Damanhouri Z. A., Anwar F. A review on therapeutic potential of Nigella sativa. Journal of Ethnopharmacology. 2013. Vol. 131, No. 1. P. 180–196.
8. Ahmad A., Husain A., Mujeeb M., Khan S. A., Najmi A. K., Siddique N. A., Damanhouri Z. A., Anwar F. A review on therapeutic potential of Nigella sativa. Journal of Ethnopharmacology. 2013. Vol. 131, No. 1. P. 180–196. DOI: 10.1016/j.jep.2010.07.005
9. S. Isik, M. Kartal, and S. A. Erdem, "Quantitative analysis of thymoquinone in Nigella Sativa L. (Black Cumin) seeds and commercial seed oils and seed oil capsules from Turkey," Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Dergisi, vol. 41, no. 1, pp. 34–41, 2017.
10. Z. Solati, B. S. Baharin, and H. Bagheri, "Antioxidant property, thymoquinone content and chemical characteristics of different extracts from Nigella sativa L. seeds", Journal of the American Oil Chemists' Society, vol. 91, no. 2, pp. 295–300, 2014.
11. Herlina, S. A. Aziz, A. Kurniawati, and D. N. Faridah, "Changes of thymoquinone, thymol, and malondialdehyde content of black cumin (Nigella sativa L.) in response to Indonesia tropical", Journal of Biosciences, vol. 24, no. 3, pp. 156–161, 2017.
12. R. Salea, E. Widjojokusumo, A. W. Hartanti, B. Veriansyah, and R. R. Tjandrawinata, "Supercritical fluid carbon dioxide extraction of Nigella sativa (black cumin) seeds using taguchi method and full factorial design", Biochemical Compounds, vol. 1, no. 1, p. 1, 2013.
13. Amin B., Hosseinzadeh H. Black Cumin (Nigella sativa) and Its Active Constituent, Thymoquinone: A Review on Pharmacological Effects and Mechanisms of Action. Iranian Journal of Basic Medical Sciences. 2016. Vol. 19, No. 9. P. 929–944.
14. B. K. Mehta, M. Verma, and M. Gupta, "Novel lipid constituents identified in seeds of Nigella sativa (Linn)", Journal of the Brazilian Chemical Society, vol. 19, no. 3, pp. 458–462, 2008.
15. I. San Mauro-Martín, J. A. Blumenfeld-Olivares, E. Garicano-Vilar, M. Á. Cuadrado, M. J. Ciudad-Cabañas, and L. Collado-Yurrita, "Differences in the effect of plant sterols on lipid metabolism in men and women", Topics in Clinical Nutrition, vol. 33, no. 1, pp. 31–40, 2018.
16. S. Cheikh-Rouhou, S. Besbes, B. Hentati, C. Blecker, C. Deroanne, and H. Attia, "Nigella sativa L.: chemical composition and physicochemical characteristics of lipid fraction", Food Chemistry, vol. 101, no. 2, pp. 673681, 2007.
17. M. Zaunschirm, M. Pignitter, J. Kienesberger et al., "Contribution of the ratio of tocopherol homologs to the oxidative stability of commercial vegetable oils", Molecules, vol. 23, no. 1, p. 206, 2018.
18. R. Daryabeygi-Khotbehsara, M. Golzarand, M. P. Ghaffari, and K. Djafarian, "Nigella sativa improves glucose homeostasis and serum.
19. Shahbazi E., Safipor B., Saeidi K., Golkar P. Responses of Nigella damascena L. and Nigella sativa L. to drought stress: yield, fatty acid composition and antioxidant activity. Journal of Agricultural Science and Technology. 2022. Vol. 24, Issue 3. PP. 693– 705.

20. Бойко М., Подобій О., Житнецький І. Розробка технології харчової добавки на основі кмину чорного. Актуальні проблеми хімії та хімічної технології: 71 зб. матеріалів доп. учасн. ІІІ Міжнар. наук.-практ. конф., 21–22 листопада. 2018 р. К. : НУХТ, 2018. С. 192–193. 37. Савчук, Ю. Ю., Усатюк С. І. Методи виявлення фальсифікації олії чорного кмину. Якість і безпека харчових продуктів: міжнар. наук.-практ. конф., 14–15 листопада 2013 р. К. : НУХТ, 2013. С. 82–83.

21. Matthaus B., Özcan M.M. Fatty acids, tocopherol, and sterol contents of some Nigella species seed oil. Czech Journal of Food Sciences. 2011. Vol. 29, no. 2. PP. 145– 150.

22. Margout D., Kelly M.T., Meunier S., Auinger D., Pelissier Y., Larroque M. Morphological, microscopic and chemical comparison between Nigella sativa L. cv. (black cumin) and Nigella damascena L. cv. Journal of Food, Agriculture & Environment. 2013. Vol.11. PP. 165–171.

23. Toma C.-C., Olah N.-K., Vlase L., Mogoșan C., Mocan A.Comparative studies on polyphenolic composition, antioxidant and diuretic effects of Nigella sativa L. (black cumin) and Nigella damascena L. (lady-in-a-mist) seeds. Molecules. 2015. Vol. 20. PP. 9560–9574.

24. Cheikh-Rouhou S., Besbes S., Hentati B., Blecker Ch., Deroanne C., Attia H. Nigella sativa L.: chemical composition and physicochemical characteristics of lipid fraction. Food Chemistry. 2007. Vol. 101, no. 2. PP. 673–681.

25. Dinagaran S., Sridhar S., Eganathan P. Chemical composition and antioxidant activities of black seed oil (Nigella sativa L.). International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research. 2016. Vol. 7, Issue 11. PP. 4473–4479.

26. Ніколова Н. С., Данилів С. І. Аналіз жирної олії Nigella sativa L. виробництва України та Болгарії. Вісник медичних і біологічних досліджень. 2022. № 1. С. 80–83.

27. Asdadi A., Harhar H., Gharby S., Bouzoubaâ Z., El Yadini A., Moutaj R., El Hadek M., Chebli B., Hassani L. M. I. Chemical composition and antifungal activity of Nigella sativa L. Oil seed cultivated in Morocco. International Journal of Pharmaceutical Science Invention. 2014. Vol. 3, Issue 11. PP. 9–15.

28. Salehi B., Quispe C., Imran M., Ul-Haq I., Živković J., Abu-Reidah I.M., Sen S., Taheri Y., Acharya K., Azadi H., del Mar Contreras M., Segura-Carretero A., Mnayer D., Sethi G., Martorell M., Abdull R. A. F., Sunusi U., Kamal R. M., Rasul S. H. A., SharifiRad J. Nigella plants – Traditional Uses, Bioactive Phytoconstituents, Preclinical and Clinical Studies. Frontiers in Pharmacology. 2021. Vol. 12. PP. 3–26.

29. Радзієвська І. Г., Мельник О. П., Пушнова А. О. Використання олії чорного кмину у складі засобу для волосся. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2019. Т. 25. № 6. С. 164–171.

References

1. USDA, ARS, National Genetic Resources Program. (n.d.). Germplasm Resources Information Network (GRIN-Taxonomy). National Germplasm Resources Laboratory, Beltsville, Maryland

2. Kobiv, Y. (2004). Chornushka siina. In Dictionary of Ukrainian scientific and folk names of vascular plants (p. 286). Kyiv: Naukova Dumka.

3. Aggarwal, B. B. (2012). Molecular targets and therapeutic uses of spices (p. 259). World Scientific. ISBN 978-981-4468-95-4.

4. Boskabady, M. H., & Shirmohammadi, B. (2002). Effect of Nigella sativa on isolated guinea pig trachea. Archives of Iranian Medicine, 5(2), 103–107.

5. Takruri, H. R. H., & Dameh, M. A. (1998). Study of the nutritional value of black cumin seeds (Nigella sativa L.). Journal of the Science of Food and Agriculture, 76(3), 404–410.

6. Yimer, E. M., Tuem, K. B., Karim, A., Ur-Rehman, N., & Anwar, F. (2019). Nigella sativa L. (Black cumin): A promising natural remedy for wide range of illnesses. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2019, 1–16.

7. Ahmad, A., Husain, A., Mujeeb, M., Khan, S. A., Najmi, A. K., Siddique, N. A., Damanhouri, Z. A., & Anwar, F. (2013). A review on therapeutic potential of Nigella sativa. Journal of Ethnopharmacology, 131(1), 180–196.

8. Ahmad, A., Husain, A., Mujeeb, M., Khan, S. A., Najmi, A. K., Siddique, N. A., Damanhouri, Z. A., & Anwar, F. (2013). A review on therapeutic potential of Nigella sativa. Journal of Ethnopharmacology, 131(1), 180–196. https://doi.org/10.1016/j.jep.2010.07.005

9. Isik, S., Kartal, M., & Erdem, S. A. (2017). Quantitative analysis of thymoquinone in Nigella sativa L. (Black cumin) seeds and commercial seed oils and seed oil capsules from Turkey. Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Dergisi, 41(1), 34–41.

10. Solati, Z., Baharin, B. S., & Bagheri, H. (2014). Antioxidant property, thymoquinone content and chemical characteristics of different extracts from Nigella sativa L. seeds. Journal of the American Oil Chemists' Society, 91(2), 295–300.

11. Herlina, Aziz, S. A., Kurniawati, A., & Faridah, D. N. (2017). Changes of thymoquinone, thymol, and malondialdehyde content of black cumin (Nigella sativa L.) in response to Indonesia tropical climate. Journal of Biosciences, 24(3), 156–161.

12. Salea, R., Widjojokusumo, E., Hartanti, A. W., Veriansyah, B., & Tjandrawinata, R. R. (2013). Supercritical fluid carbon dioxide extraction of Nigella sativa (black cumin) seeds using Taguchi method and full factorial design. Biochemical Compounds, 1(1), 1.

13. Amin, B., & Hosseinzadeh, H. (2016). Black cumin (Nigella sativa) and its active constituent, thymoquinone: A review on pharmacological effects and mechanisms of action. Iranian Journal of Basic Medical Sciences, 19(9), 929–944.

14. Mehta, B. K., Verma, M., & Gupta, M. (2008). Novel lipid constituents identified in seeds of Nigella sativa (Linn). Journal of the Brazilian Chemical Society, 19(3), 458–462.

15. San Mauro-Martín, I., Blumenfeld-Olivares, J. A., Garicano-Vilar, E., Cuadrado, M. Á., Ciudad-Cabañas, M. J., & Collado-Yurrita, L. (2018). Differences in the effect of plant sterols on lipid metabolism in men and women. Topics in Clinical Nutrition, 33(1), 31–40.

16. Cheikh-Rouhou, S., Besbes, S., Hentati, B., Blecker, C., Deroanne, C., & Attia, H. (2007). Nigella sativa L.: Chemical composition and physicochemical characteristics of lipid fraction. Food Chemistry, 101(2), 673–681.

17. Zaunschirm, M., Pignitter, M., Kienesberger, J., et al. (2018). Contribution of the ratio of tocopherol homologs to the oxidative stability of commercial vegetable oils. Molecules, 23(1), 206.

18. Daryabeygi-Khotbehsara, R., Golzarand, M., Ghaffari, M. P., & Djafarian, K. (2017). Nigella sativa improves glucose homeostasis and serum lipids in type 2 diabetes: A systematic review and meta-analysis. Complementary Therapies in Medicine, 35, 6–13.

19. Shahbazi, E., Safipor, B., Saeidi, K., & Golkar, P. (2022). Responses of Nigella damascena L. and Nigella sativa L. to drought stress: Yield, fatty acid composition and antioxidant activity. Journal of Agricultural Science and Technology, 24(3), 693–705.

20. Boyko, M., Podobii, O., & Zhytnetskyi, I. (2018). Development of a food additive technology based on black cumin. In Actual Problems of Chemistry and Chemical Technology: Proceedings of the III International Scientific-Practical Conference (pp. 192–193). Kyiv: NUFT.

21. Matthäus, B., & Özcan, M. M. (2011). Fatty acids, tocopherol, and sterol contents of some Nigella species seed oil. Czech Journal of Food Sciences, 29(2), 145–150.

22. Margout, D., Kelly, M. T., Meunier, S., Auinger, D., Pelissier, Y., & Larroque, M. (2013). Morphological, microscopic and chemical comparison between Nigella sativa L. cv. (black cumin) and Nigella damascena L. cv. Journal of Food, Agriculture & Environment, 11, 165–171.

23. Toma, C.-C., Olah, N.-K., Vlase, L., Mogoşan, C., & Mocan, A. (2015). Comparative studies on polyphenolic composition, antioxidant and diuretic effects of Nigella sativa L. (black cumin) and Nigella damascena L. (lady-in-a-mist) seeds. Molecules, 20, 9560–9574.

24. Cheikh-Rouhou, S., Besbes, S., Hentati, B., Blecker, C., Deroanne, C., & Attia, H. (2007). Nigella sativa L.: Chemical composition and physicochemical characteristics of lipid fraction. Food Chemistry, 101(2), 673–681.

25. Dinagaran, S., Sridhar, S., & Eganathan, P. (2016). Chemical composition and antioxidant activities of black seed oil (Nigella sativa L.). International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research, 7(11), 4473–4479.

26. Nikolova, N. S., & Danyliv, S. I. (2022). Analysis of fatty oil of Nigella sativa L. produced in Ukraine and Bulgaria. Bulletin of Medical and Biological Research, 1, 80–83.

27. Asdadi, A., Harhar, H., Gharby, S., Bouzoubaâ, Z., El Yadini, A., Moutaj, R., El Hadek, M., Chebli, B., & Hassani, L. M. I. (2014). Chemical composition and antifungal activity of Nigella sativa L. oil seed cultivated in Morocco. International Journal of Pharmaceutical Science Invention, 3(11), 9–15.

28. Salehi, B., Quispe, C., Imran, M., Ul-Haq, I., Živković, J., Abu-Reidah, I. M., Sen, S., Taheri, Y., Acharya, K., Azadi, H., del Mar Contreras, M., Segura-Carretero, A., Mnayer, D., Sethi, G., Martorell, M., Abdull, R. A. F., Sunusi, U., Kamal, R. M., Rasul, S. H. A., Sharifi-Rad, J. (2021). Nigella plants – Traditional uses, bioactive phytoconstituents, preclinical and clinical studies. Frontiers in Pharmacology, 12, 3–26.

29. Radziievska, I. H., Melnyk, O. P., & Pushnova, A. O. (2019). Use of black cumin oil in hair care products. Scientific Works of the National University of Food Technologies, 25(6), 164–171.

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 17.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ

УДК 631.147:658.8:004:338.43 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.46

Т. В. УСТІК
доктор економічних наук,
професор кафедри маркетингу та логістики
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-9967-0669

О. М. СОРОКОЛІТ
здобувач наукового ступеня доктора філософії (PhD) 075 Маркетинг
кафедри маркетингу та логістики
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0009-0003-8128-0680

ВПРОВАДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ МАРКЕТИНГОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ ПРОСУВАННЯ ОРГАНІЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ В УМОВАХ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Стаття присвячена дослідженню впровадження цифрових маркетингових інструментів у просуванні органічної продукції в Україні в умовах сталого розвитку. У роботі окреслено основні виклики, з якими стикається органічний сектор: низький рівень внутрішнього споживчого попиту, обмежена інфраструктура збуту, залежність від експорту до країн ЄС, а також воєнні ризики та перебудова логістичних ланцюгів. Автор підкреслює, що хоча за останні роки обсяги продажів органіки в Україні зросли в кілька разів, внутрішній ринок залишається недостатньо розвиненим, а зростання попиту потребує активної комунікаційної підтримки. Європейський ринок органічної продукції, який у 2023 році сягнув 54,7 млрд євро, формує високі вимоги до цифрової прозорості, простежуваності ланцюга постачання та відповідності сертифікаційним стандартам, що створює бар'єри для експортерів без належної цифрової доказової бази.

Соціальні мережі, SEO-оптимізація вебсайтів, e-commerce платформи та маркетплейси стають ключовими каналами комунікації зі споживачами, сприяють формуванню бренду та поширенню інформації про сертифікацію, походження і екологічні переваги продукції. Цифрові інструменти ефективні тоді, коли стратегія поєднує прозорість даних, доказовість сталого впливу, персоналізацію контенту та омніканальні продажі. Особливу увагу треба приділяти сегментації аудиторії: молодші споживачі більш активно реагують на інтерактивний та динамічний контент, тоді як старші групи очікують доказової інформації про сертифікацію і контроль якості.

У статті висвітлено роль CRM- та CDP-систем, машинного навчання та аналітики великих даних у формуванні «ланцюга довіри» та підвищенні конкурентоспроможності аграрного бізнесу. Такі інструменти дозволяють інтегрувати дані з різних джерел, прогнозувати попит, оптимізувати рекламні бюджети, забезпечувати наскрізну аналітику продажів. У статті також наголошено на важливості інтеграції технологій Industry 4.0, зокрема IoT для збору телеметрії, блокчейну для прозорої простежуваності та FAIR-принципів у політиці даних. Це створює умови для більшої персоналізації комунікацій, скорочення витрат на маркетинг та швидкої адаптації до турбулентного середовища, включно з умовами воєнного стану.

Ефективне цифрове просування органічної продукції має спиратися на комплексну екосистему інструментів: від SMM і відеоконтенту до маркетплейсів та інтерактивної реклами. Наявність власної e-commerce платформи або присутність на міжнародних онлайн-ринках розглядається як обов'язкова умова для виходу на ширшу аудиторію. Стійка диференціація органічних брендів досягається через побудову довіри, лояльності та прозорої комунікації з клієнтами. Саме цифрові стратегії, засновані на data-driven управлінні та інтеграції з цілями сталого розвитку, дозволяють українським агропідприємствам не лише підтримувати експорт, а й розвивати внутрішній ринок, формуючи основу для довготривалого конкурентного зростання.

Ключові слова: *цифровий маркетинг, органічна продукція, сталий розвиток, соціальні мережі, споживча поведінка, сільське господарство, електронна комерція, зелений маркетинг.*

© Устік Т. В., Сороколіт О. М., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

T. V. USTIK
Doctor of Economic Sciences,
Professor at the Department of Marketing and Logistics
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0001-9967-0669

O. M. SOROKOKIT
Postgraduate Student in Speciality 075 Marketing
at the Department of Marketing and Logistics
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0009-0003-8128-0680

IMPLEMENTATION OF DIGITAL MARKETING INSTRUMENTS FOR THE PROMOTION OF ORGANIC PRODUCTS UNDER SUSTAINABLE DEVELOPMENT CONDITIONS

The article is devoted to the study of the implementation of digital marketing tools in promoting organic products in Ukraine under the conditions of sustainable development. The paper outlines the main challenges faced by the organic sector: low level of domestic consumer demand, limited sales infrastructure, dependence on exports to EU countries, as well as war risks and the restructuring of supply chains. The author emphasizes that although the volume of organic sales in Ukraine has increased several times in recent years, the domestic market remains underdeveloped, and the growing demand requires active communication support. The European organic market, which reached €54.7 billion in 2023, sets high requirements for digital transparency, supply chain traceability, and compliance with certification standards, creating barriers for exporters without an adequate digital evidence base.

Social media, SEO optimization of websites, e-commerce platforms, and marketplaces are becoming key channels of communication with consumers, contributing to brand formation and the dissemination of information about certification, origin, and environmental benefits of products. Digital tools are effective when the strategy combines data transparency, proven sustainability impact, content personalization, and omnichannel sales. Special attention should be paid to audience segmentation: younger consumers respond more actively to interactive and dynamic content, while older groups expect evidence-based information about certification and quality control.

The article highlights the role of CRM and CDP systems, machine learning, and big data analytics in forming a "trust chain" and enhancing the competitiveness of agribusiness. Such tools make it possible to integrate data from various sources, forecast demand, optimize advertising budgets, and ensure end-to-end sales analytics. The article also emphasizes the importance of integrating Industry 4.0 technologies, in particular IoT for telemetry collection, blockchain for transparent traceability, and FAIR principles in data policy. This creates conditions for greater personalization of communications, reduced marketing costs, and rapid adaptation to a turbulent environment, including wartime conditions.

Effective digital promotion of organic products should rely on a comprehensive ecosystem of tools: from SMM and video content to marketplaces and interactive advertising. The presence of an in-house e-commerce platform or representation on international online markets is considered a mandatory condition for reaching a wider audience. Sustainable differentiation of organic brands is achieved through building trust, loyalty, and transparent communication with clients. Digital strategies based on data-driven management and integration with sustainable development goals enable Ukrainian agricultural enterprises not only to maintain exports but also to develop the domestic market, forming the basis for long-term competitive growth.

Key words: *digital marketing, organic products, sustainable development, social media, consumer behavior, agriculture, e-commerce, green marketing.*

Постановка проблеми

Сучасна світова економіка перебуває на етапі, що характеризується посиленою увагою до концепції сталого розвитку. Ця парадигма передбачає інтеграцію економічного зростання з екологічною відповідальністю та соціальною справедливістю на всіх рівнях. В цьому контексті органічне сільське господарство розглядається як один із ключових напрямів реалізації концепції сталого розвитку, що забезпечує виробництво якісних харчових продуктів з мінімальним впливом на довкілля.

Україна, володіючи значним аграрним потенціалом та близько 50 % світових запасів чорнозему, має унікальні можливості для розвитку органічного виробництва. Проте, незважаючи на сприятливі природно-кліматичні умови, частка органічної продукції на внутрішньому ринку України залишається незначною.

Водночас глобальні тенденції свідчать про стрімке зростання ринку органічної продукції. Це зростання значною мірою обумовлено зміною споживчих уподобань, підвищенням екологічної свідомості населення та розвитком цифрових технологій, що створюють нові можливості для маркетингу органічної продукції.

Цифрова трансформація маркетингу відкриває нові перспективи для просування органічної продукції, яка прискорила процеси діджиталізації споживчої поведінки. Соціальні мережі, електронна комерція, мобільні додатки та інші цифрові платформи стають основними каналами комунікації з споживачами органічної продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У науковій літературі останніх років питання впровадження цифрових маркетингових інструментів у просуванні органічної продукції розглядається крізь призму як теоретичних підходів, так і практичних результатів. Українські дослідники акцентують увагу на трансформації аграрного сектору під впливом цифровізації. Так, Бондаренко В. М., Омельяненко О. В. доводять, що Big Data та аналітика дозволяють агробізнесу прогнозувати попит, мінімізувати ризики й формувати довгострокові відносини з клієнтами [1]. Ільченко Т. В. [2], Косенко О. П., Косенко Є. А., Косенко С. А. [4], а також Кобернюк С. О. та Карпенко В. Л. [3] підкреслюють роль цифрових стратегій у побудові конкурентних переваг аграрних підприємств, зокрема через розвиток e-commerce, омніканальних продажів та інноваційних моделей комунікації. Пахуча Е. В., Афанасьєва О. П., Куліш Г. О. [6] розглядають цифрові технології як чинник підвищення стійкості бізнесу, тоді як Лазаренко В. І. [5] акцентує на інтеграції екологічного маркетингу в умовах воєнного стану.

Значна увага приділяється питанням формування лояльності та довіри до органічних брендів. Пахуча Е. та Коломієць Ю. [7] наголошують, що цифровий маркетинг підвищує рівень обізнаності споживачів та сприяє їх готовності платити вищу ціну за органічні продукти, а Новицька І. та співавтори [16] підкреслюють роль соціальних мереж як основного каналу комунікації для малих і сімейних господарств. Гаврилюк Ю. [14] акцентує на інноваційних підходах до управління маркетингом у фермерських господарствах, включно з CRM-системами та автоматизованими платформами для комунікацій. Скакун О. та Луцій О. [9] пропонують методичні засади збору та аналітики цифрових даних, що дозволяє оптимізувати рекламні стратегії та підвищити рентабельність просування.

Міжнародні дослідження доповнюють український контекст, зосереджуючись на зміні поведінки споживачів та ролі цифрових інструментів у формуванні попиту. Al-Ababneh та ін. [10] показали, що інтерактивна цифрова реклама значно впливає на купівельні наміри споживачів органічної продукції. Anisimova T. та Vrontis D. [11] виявили, що довіра до органічної їжі залежить від вікових характеристик та ціннісних орієнтацій покупців, що обґрунтовує необхідність сегментації комунікацій. Maloo A., Agnihotri K. [20] доводять ефективність соціальних мереж у просуванні органіки та підвищенні поінформованості споживачів.

Формулювання мети дослідження

Проаналізувати ефективність впровадження цифрових маркетингових інструментів для просування органічної сільськогосподарської продукції в умовах сталого розвитку в Україні. Дослідження спрямоване на виявлення ключових тенденцій цифрового маркетингу в органічному сільському господарстві, аналіз споживчої поведінки щодо органічної продукції та розробку рекомендацій щодо оптимізації маркетингових стратегій.

Викладення основного матеріалу дослідження

Ринок органічної продукції в Україні демонструє стрімке зростання, незважаючи на виклики, включаючи військові дії та економічні коливання. Обсяги продажів органічної продукції в Україні зросли в кілька разів за останні роки, що пов'язано з підвищенням екологічної свідомості та здорового способу життя населення. Разом із цим, внутрішній ринок органічної продукції в Україні лишається недостатньо розвиненим через низьку обізнаність споживачів та обмежену інфраструктуру збуту [3, с. 210].

Європейський фон попиту підтверджує масштаб і стабільність ринку органіки. У 2023 році в Європі органічними методами було оброблено 19,5 млн га (з них 17,7 млн га в ЄС), що підвищує вимоги до простежуваності походження продукції, підтверджених сертифікатами, і створює «вхідний бар'єр» для постачальників без належної цифрової доказової бази [19, с. 178].

Роздрібні продажі органічної продукції у Європі у 2023 році досягли 54,7 млрд євро (46,5 млрд у межах ЄС), і це безпосередньо формує для виробників вимоги до цифрової якості комунікацій, від доказів впровадження цілей сталого розвитку (сертифікація, вуглецевий слід, прозора історія партій) до сервісу в e-commerce (швидка доставка, зрозуміле повернення, безпечна оплата), інтегрованих у цифрові вітрини та маркетплейси [19, с. 193].

На тлі зовнішньої торгівлі ЄС органікою 2023 рік позначився падінням імпорту до 2,48 млн т (–9,1 % р/р), зі скороченням постачань фруктів, цукру, оливкової та пальмової олії та одночасним зростанням імпорту пшениці. Така волатильність товарних груп вимагає від експортерів точного цифрового планування портфеля SKU, адаптивної комунікації та гнучкої роботи з каналами збуту [13, 12].

Водночас роль України у європейській органічній торгівлі залишається стратегічною в окремих нішах. Імпортозалежність ринку ЄС підкреслює потребу у високій якості простежуваності, стандартах даних і спеціалізації експорту, що знімає інформаційні асиметрії на ринку органічної продукції [15].

Значна частка виробленої органічної продукції як і раніше орієнтована на експорт до Європейського Союзу. Внутрішній ринок органічної продукції залишається не розвиненим. Стимулювання внутрішнього попиту за допомогою цифрових маркетингових інструментів є одним із найважливіших завдань для українських фермерів та агропідприємств.

Для українського агросектору переорієнтація на внутрішній ринок не лише є доцільною, а критично необхідною у зв'язку з воєнними ризиками, новою логістикою та зсувом каналів збуту.

Цифровий маркетинг відкриває нові перспективи для виробників органічної продукції в Україні. Саме цифрові стратегії дозволили малому та середньому агробізнесу утримувати продажі, зміщуватися в онлайн і розвивати спільноти лояльних покупців [17, с. 20].

Соціальні мережі є основними каналами для формування бренду, поширення інформації та комунікації зі споживачами. Використання SEO-оптимізації веб-сайтів сприяє підвищенню видимості органічних продуктів у пошукових системах, що значно розширює аудиторію потенційних покупців.

Цифрові маркетингові інструменти для просування органічної продукції працюють тоді, коли стратегія поєднує прозорість ланцюга постачання, дані про сталий вплив, персоналізацію комунікацій та омніканальні продажі. У такій архітектурі саме інформація й цифрові інструменти стають ключем до конкурентної переваги і сталого розвитку аграрних підприємств [2].

Ключ до зростання в органічному секторі – довіра та лояльність. Довіра до органічної їжі формується через відповідність особистим цінностям споживача, причому саме вік впливає на силу зв'язку «цінності» та «довіри». Вік споживача підсилює зв'язок між ціннісними орієнтаціями (зокрема self-symbolism, security) та довірою до органічної їжі – це означає необхідність вікової сегментації креативів, каналів і аргументації користі. Молодші групи краще реагують на динамічний, інтерактивний контент і UGC, старші – на доказову інформацію про сертифікацію, походження і контроль якості [11].

Лояльність до органіки серед активних покупців дуже висока. Споживачі готові платити більше та робити повторні покупки за умови, що бренд надає прозорі докази впровадження цілей сталого розвитку і комунікує вигоди для здоров'я та довкілля [7].

За рахунок своїх алгоритмів, соціальні мережі «підхоплюють» цей попит створюючи тренди. Належно локалізований та культурно релевантний контент істотно підвищує намір купівлі. Інтерактивні оголошення, відео та стріми збільшують і увагу, і конверсії [20, с. 339].

Рекламні інструменти працюють краще, коли є культурна релевантність і взаємодія. Культурно узгоджені оголошення в соціальних медіа демонструють вищу увагу й намір купівлі органічної продукції, особливо, якщо це доповнено інтерактивними форматами. Тому спеціальні формати (відео, стріми, опитування, AR-примірки) мають бути ядром медіа-міксу [10, с. 650].

Для побудови ефективної комунікаційної стратегії варто використовувати типову карту подорож клієнта (CJM) для органічного бренду, яка зображена на рисунку 1.

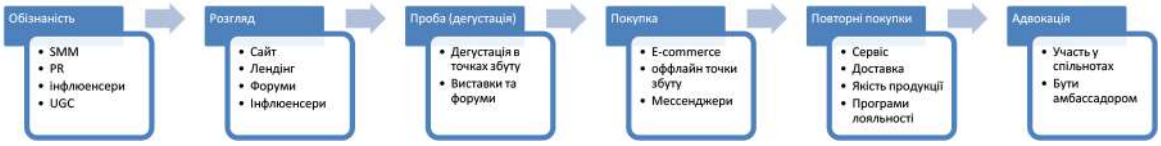


Рис. 1. Customer Journey Map для органічного бренду

Джерело: систематизовано автором

Для дрібних і сімейних господарств соціальні мережі часто виконують радше іміджево-комунікаційну, ніж чисто торговельну функцію. В такому випадку, ефективність включає системні рубрики про походження, сертифікацію та екологічний ефект, що зменшує інформаційний розрив і готує споживачів до купівлі [16, с. 527].

Ефективність цифрової стратегії в агробізнесі значно зростає завдяки максимальному використанню CRM та CDP, що дозволяє інтегрувати дані з веб-аналітики, соціальних мереж та продажів. Такий підхід забезпечує цілісну картину воронки продажів і, відповідно, підвищує конкурентоспроможність. Ключовим є управління даними є їх уніфікація, інтеграція та візуалізація в єдиному контурі. Крім того, застосування алгоритмів машинного навчання (ML) для прогнозування попиту, бюджету та показника рентабельності рекламних витрат (ROAS) значно посилює ефективність цієї стратегії [9].

Цифрова маркетингова стратегія повинна спиратися на data-driven управління і технології Industry 4.0. У практиці агробізнесу це означає, що дані з публічних і власних джерел використовуються моделями машинного навчання для прогнозу попиту та еластичності для перехресних продажів, IoT для збору телеметрії як доказів якості (температура, вологість, геотрекінг), блокчейн для прозорого «ланцюга довіри». Саме така архітектура підвищує персоналізацію, знижує витрати на комунікацію та зміцнює спроможність швидко перелаштовуватися до змін середовища, у тому числі воєнних [18, с. 58].

Для забезпечення керованості, всі рішення спираються на політику даних, тобто принципи FAIR (знаходжуваність, доступність, інтероперабельність, повторне використання), словники подій і єдині схеми ідентифікації клієнтів, наскрізна звітність, а також GDPR-сумісні згоди та канали ретаргетингу. Для сегментації впливу доцільно застосовувати SNA-метрики для виявлення лідерів думок у нішевих спільнотах органічної продукції [9].

Екологічний маркетинг органічного виробництва потребує системного підходу в комунікаціях (прозорість сертифікації, підтверджені екологічні вигоди, відповідність очікуванням під час війни), що зміцнює довіру як базову мету цифрового просування [5, с. 29].

Для практичної реалізації необхідно «перекласти» цілі сталого розвитку у керовані маркетингові дії та використовувати інтегровані маркетингові комунікації (або стратегічне маркетингове планування). Узагальнені цілі та інструменти вказані в таблиці 1.

Таблиця 1

Узагальнена матриця «Цілі – Інструменти – KPI»:

Стратегічна ціль	Інструменти	Ключові KPI
Підвищення довіри	Прозорий контент про сертифікацію, сторітелінг принципів сталого розвитку, блокчейн-трекинг	Рівень довіри, час на сторінці, % верифікованих ланцюгів
Зростання лояльності	CRM-сегментація, email-роззсилки, месенджери, програми лояльності	Утримання, повторні покупки, CLV
Ріст конверсій	SEO та SEM, інтерактивна реклама, сайт (інтернет-магазин)	CTR, CVR, CPA, AOV
Розширення ринку	Маркетплейси, локалізований культурний контент, крос-бордер логістика	Нові канали збуту
Ефективність бюджету	Атрибуція, автоматизація рекламного бюджету, ML-прогнози	ROAS, ROMI

Джерело: систематизовано автором

Стійка диференціація органічного бренду досягається через побудову надійного «ланцюга довіри», який охоплює всі етапи життєвого циклу продукту – від вирощування сировини до споживання готового товару. Цей ланцюг включає прозорість походження інгредієнтів, сертифікацію органічного виробництва, екологічно чисті технології переробки, відповідальну упаковку та чесну комунікацію з споживачами. Кожна ланка цього процесу має бути документована та верифікована незалежними органами, що створює основу для довгострокових відносин із свідомими споживачами. Органічні бренди, які успішно формують такий ланцюг довіри, отримують конкурентну перевагу через лояльність клієнтів, можливість встановлювати преміальні ціни та стійкість до ринкових коливань. Схема «ланцюга довіри» зображена на рисунку 2.



Рис. 2. «Ланцюг довіри» для органічного бренду

Джерело: систематизовано автором [18, с. 56]

Ефективне цифрове просування органічних продуктів потребує комплексного підходу, що базується на інтегрованій екосистемі взаємопов'язаних технологічних рішень. Центральним елементом такої системи виступає SMM-платформа, яка включає багатоформатний відеоконтент, інтерактивні прямі трансляції та механіки для залучення та взаємодії з аудиторією. Соціальні медіа створюють прямий доступ до мільйонів користувачів і дають змогу точного таргетування/персоналізації під демографію, інтереси та поведінку; у категорії органіки це підсилює вплив бренду на вибір і скорочує «шлях до кошика» – за умови, що повідомлення підкріплені доказами якості й сталості [6, с. 159].

Практичні кейси в Україні демонструють, що системна присутність у соцмережах (діалог зі споживачами, оперативні роз'яснення, кризові відповіді, програми лояльності) підвищує довіру та лояльність, і це особливо важливо в періоди турбулентності ринку та логістики [1].

Всі SMM-платформи доповнюються сайтом, де систематизовано інформацію про сертифікати якості, детальну історію походження продукції, кількісні показники екологічного впливу та порівняльний аналіз із традиційними альтернативами [21, с. 558].

Наявність власної e-commerce платформи або присутність на провідних маркетплейсах, в сучасних умовах є обов'язковою. Ці платформи доповнюють CRM системи, які забезпечують глибоку персоналізацію комунікацій, прогнозування поведінки клієнтів та розробку програм утримання на основі індивідуальних переваг [8].

Аналітичний контур з машинним навчанням дозволяє в реальному часі оптимізувати маркетингові кампанії, прогнозувати попит, автоматизувати сегментацію аудиторії та максимізувати ROI від рекламних інвестицій. Така системна архітектура цифрових інструментів створює синергетичний ефект, забезпечуючи керований масштабований ріст органічного бізнесу з прозорою та прогнозованою економічною моделлю [18, с. 56].

Стратегія має лишатися «живою» – цикл планування-вимірювання-адаптації з опорою на дані (FAIR-підходи, уніфікація схем ідентифікації клієнтів, наскрізна BI-звітність) перетворює цифрові інструменти на відтворювану систему створення довіри, лояльності й сталого зростання продажів для органічних брендів [9, с. 429].

Висновки

Впровадження цифрових маркетингових інструментів є критично важливим для сталого розвитку ринку органічної продукції в Україні. Внутрішній ринок органіки залишається недостатньо розвиненим через низьку обізнаність споживачів, слабку інфраструктуру та залежність від експорту. У цьому контексті цифровий маркетинг виступає як інструмент не лише для розширення збуту, а й для формування культури екоспоживання. Соціальні мережі та інтернет сайти надають можливість підтвердження прозорості походження та сертифікації товару, а також зручність взаємодії зі споживачем, що безпосередньо впливає на довіру до бренду.

Цифрові технології створюють умови для персоналізації комунікацій, адаптації контенту під різні вікові та ціннісні групи споживачів і водночас дозволяють аграрним підприємствам підвищувати ефективність управлінських рішень. Інтеграція CRM і CDP систем, застосування аналітики великих даних та IoT формують «ланцюг довіри» у просуванні органіки, де кожна ланка – від вирощування до доставки – підтверджена цифровими доказами. Це дає можливість зменшувати інформаційні асиметрії, підвищувати лояльність клієнтів і створювати умови для преміального ціноутворення.

Впровадження ефективних digital-інструментів у просуванні органічної продукції напряму пов'язане зі стратегічними цілями сталого розвитку. Використання екологічно релевантного контенту, інтерактивної реклами та омніканальних продажів сприяє не лише підвищенню конверсій, а й формуванню довготривалої конкурентної переваги. Досвід як європейських, так і українських підприємств доводить, що цифрова стратегія, побудована на прозорості, доказовості та культурній релевантності, є основою для зростання довіри, лояльності та стійкості органічного бізнесу навіть у кризових умовах, зокрема під час війни.

Список використаної літератури

1. Бондаренко В. М., Омельяненко О. В. Тенденції розвитку аграрного сектору економіки України в контексті розвитку цифрової маркетингової діяльності. *Економіка та суспільство*. 2024. Вип. 59. DOI: 10.32782/2524-0072/2024-59-16

2. Ільченко Т. В. Маркетингова стратегія діяльності аграрних підприємств в умовах діджиталізації. *Економіка та суспільство*. 2021. Вип. 26. DOI: 10.32782/2524-0072/2021-26-21

3. Кобернюк С. О., Карпенко В. Л. Напрями цифровізації маркетингу аграрних підприємств. *Innovation and Sustainability*. 2023. № 1. С. 204–212.

4. Косенко О. П., Косенко Є. А., Косенко С. А. Формування маркетингової стратегії підприємства в умовах цифровізації та інформатизації суспільства. *Ефективна економіка*. 2024. № 4. DOI: 10.32702/2307-2105.2024.4.34

5. Лазаренко В. І. Оцінювання існуючих підходів екологічного маркетингу щодо органічного виробництва в умовах воєнного стану. *Збалансоване природокористування*. 2023. № 1. С. 28–35. DOI: 10.33730/2310-4678.1.2023.278536

6. Пахуча Е. В., Афанасьєва О. П., Куліш Г. О. Цифрові технології в маркетинговій діяльності аграрних підприємств: напрям забезпечення стійкості бізнесу. *Економіка та держава*. 2024. № 12. С. 155–161. DOI: 10.32702/2306-6814.2024.12.155

7. Пахуча Е., Коломієць Ю. Цифровий маркетинг як інструмент формування лояльності споживачів на ринку органічної продукції. *Journal of Innovations and Sustainability*. 2024. Vol. 8, No. 3. DOI: 10.51599/is.2024.08.03.07

8. Петренко О. І. Інтеграція цифрових технологій у маркетингову стратегію аграрних підприємств: організаційно-економічний підхід. *Економіка та суспільство*. 2024. Вип. 65. DOI: 10.32782/2524-0072/2024-65-127

9. Скакун О., Луцій О. Методичні засади обробки цифрових даних для просування продукції підприємств методами інтернет-комунікацій. *Економіка та суспільство*. 2025. Вип. 76. DOI: 10.32782/2524-0072/2025-76-64

10. Al-Ababneh H. A., Vasudevan A., Alqahtani M. M., Sun X., Shelash S., Alshurideh M. T. The Role of Digital Advertising in Shaping Consumer Behaviour for Organic Agricultural Products in Jordan: A Multi-Technique Analysis. *Research on World Agricultural Economy*. 2025. Vol. 6, No. 3. P. 649–667. DOI: https://doi.org/10.30564/rwae.v6i3.1603

11. Anisimova T., Vrontis D. The food you can trust: The moderating role of age in the relationship between consumer values and organic food trust. *Journal of Business Research*. 2024. Vol. 182. Art. 114803. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2024.114803

12. European Commission. DG Agriculture and Rural Development. EU imports of organic agri-food products: Key developments in 2022 (Analytical Brief No. 2). July 2023.

13. European Commission. DG Agriculture and Rural Development. EU imports of organic agri-food products: Key developments in 2023 (Analytical Brief No. 4). July 2024.

14. Havryliuk Y. Innovative approaches to marketing management in Ukrainian farms. *Economics and Business Management*. 2024. 15(4). P. 185–196. – DOI: 10.31548/economics/4.2024.185

15. Nifatova O., Danko Y., Petrychuk S., Baleţentis T., Streimikiene D. Import dependence of the European organic market and the role of Ukrainian exports. *Technological and Economic Development of Economy*. 2024. DOI: 10.3846/tede.2024.22840

16. Novytska I., Chychkalo-Kondratska I., Chyzhevska M., Sydorenko-Melnyk H., Tytarenko L. Digital Marketing in the System of Promotion of Organic Products. *WSEAS Transactions on Business and Economics*. 2021. Vol. 18. P. 524–530. DOI: 10.37394/23207.2021.18.53

17. Oklander M., Yashkina O., Zlatova I., Cicekli I., Letunovska N. Digital Marketing in the Survival and Growth Strategies of Small and Medium-Sized Businesses During the War in Ukraine. *Marketing and Management of Innovations*. 2024. 15(1). P. 15–28.

18. Oklander M., Yashkina O., Petryshchenko N., Karandin O., Yevdokimova O. Economic aspects of Industry 4.0 marketing technologies implementation in the agricultural sector of Ukraine. *Ekonomika APK*. 2024. 31(4). P. 55–66. DOI: 10.32317/ekon.apk/4.2024.55

19. Willer H., Schlatter B., Trávníček J., Schaack D. The World of Organic Agriculture. Frick and Bonn. *FiBL & IFOAM – Organics International*. 2025. P. 175–201.

20. Maloo A., Agnihotri K. The Role of Social Media Marketing in Influencing Organic Food Consumers: The Power of Digital World. *Journal of Marketing & Social Research*. 2025. Vol. 2, Issue 1. P. 337–341.

21. Ustik T., Dubovyk T., Lagodienko V, Chernobrovkina S, Vlasenko Y., Shmatok M. Digital Content Marketing in Brand Management of Small Business Enterprises, Trading Companies and Territorial Marketing. Theoretical and Practical Research in Economic Fields, 2024 v. 15, n. 3, p. 552–565. https://journals.aserspublishing.eu/tpref/article/view/8587

References

1. Bondarenko, V. M., & Omelianenko, O. V. (2024). Tendentsii rozvytku ahrarnoho sektoru ekonomiky Ukrainy v konteksti rozvytku tsyfrovoi marketynhovoi diialnosti [Trends in the development of Ukraine's agrarian sector in the context of digital marketing activity]. *Ekonomika ta suspilstvo*, (59). https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-59-16

2. Ilchenko, T. V. (2021). Marketynhova stratehiia diialnosti ahrarnykh pidpryiemstv v umovakh didzhytalizatsii [Marketing strategy of agrarian enterprises under digitalization]. *Ekonomika ta suspilstvo*, (26). https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-26-21

3. Koberniuk, S. O., & Karpenko, V. L. (2023). Napriamy tsyfrovizatsii marketynhu ahrarnykh pidpryiemstv [Directions for digitalizing marketing of agricultural enterprises]. *Innovation and Sustainability*, (1), 204–212.

4. Kosenko, O. P., Kosenko, Ye. A., & Kosenko, S. A. (2024). Formuvannia marketynhovoi stratehii pidpryiemstva v umovakh tsyfrovizatsii ta informatyzatsii suspilstva [Formation of the enterprise marketing strategy under digitalization and informatization of society]. *Efektyvna ekonomika*, (4). https://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.4.34

5. Lazarenko, V. I. (2023). Otsiniuvannia isnuiuchykh pidkhodiv ekolohichnoho marketynhu shchodo orhanichnoho vyrobnytstva v umovakh voiennoho stanu [Assessment of existing green marketing approaches to organic production under martial law]. *Zbalansovane pryrodokorystuvannia*, (1), 28–35. https://doi.org/10.33730/2310-4678.1.2023.278536

6. Pakhucha, E. V., Afanasieva, O. P., & Kulish, H. O. (2024). Tsyfrovi tekhnolohii v marketynhovii diialnosti ahrarnykh pidpryiemstv: napriam zabezpechennia stiikosti biznesu [Digital technologies in agribusiness marketing: A pathway to business resilience]. *Ekonomika ta derzhava*, (12), 155–161. https://doi.org/10.32702/2306-6814.2024.12.155

7. Pakhucha, E., & Kolomiiets, Yu. (2024). Tsyfrovyi marketynh yak instrument formuvannia loialnosti spozhyvachiv na rynku orhanichnoi produktsii [Digital marketing as a tool for building consumer loyalty in the organic products market]. *Journal of Innovations and Sustainability*, 8(3). https://doi.org/10.51599/is.2024.08.03.07

8. Petrenko, O. I. (2024). Intehratsiia tsyfrovykh tekhnolohii u marketynhovu stratehiiu ahrarnykh pidpryiemstv: orhanizatsiino-ekonomichnyi pidkhid [Integration of digital technologies into agribusiness marketing strategy: An organizational-economic approach]. *Ekonomika ta suspilstvo*, (65). https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-65-127

9. Skakun, O., & Lutsii, O. (2025). Metodychni zasady obrobky tsyfrovykh danykh dlia prosuvannia produktsii pidpryiemstv metodamy internet-komunikatsii [Methodological bases of digital data processing for promoting enterprise products via internet communications]. *Ekonomika ta suspilstvo*, (76). https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-76-64

10. Al-Ababneh, H. A., Vasudevan, A., Alqahtani, M. M., Sun, X., Shelash, S., & Alshurideh, M. T. (2025). The role of digital advertising in shaping consumer behaviour for organic agricultural products in Jordan: A multi-technique analysis. *Research on World Agricultural Economy*, 6(3), 649–667. https://doi.org/10.30564/rwae.v6i3.1603

11. Anisimova, T., & Vrontis, D. (2024). The food you can trust: The moderating role of age in the relationship between consumer values and organic food trust. *Journal of Business Research*, 182, 114803. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2024.114803

12. European Commission, Directorate-General for Agriculture and Rural Development. (2023, July). *EU imports of organic agri-food products: Key developments in 2022 (Analytical Brief No. 2)*.

13. European Commission, Directorate-General for Agriculture and Rural Development. (2024, July). *EU imports of organic agri-food products: Key developments in 2023 (Analytical Brief No. 4)*.

14. Havryliuk, Y. (2024). Innovative approaches to marketing management in Ukrainian farms. *Economics and Business Management*, 15(4), 185–196. https://doi.org/10.31548/economics/4.2024.185

15. Nifatova, O., Danko, Y., Petrychuk, S., Baležentis, T., & Streimikiene, D. (2024). Import dependence of the European organic market and the role of Ukrainian exports. *Technological and Economic Development of Economy*. https://doi.org/10.3846/tede.2024.22840

16. Novytska, I., Chychkalo-Kondratska, I., Chyzhevska, M., Sydorenko-Melnyk, H., & Tytarenko, L. (2021). Digital marketing in the system of promotion of organic products. *WSEAS Transactions on Business and Economics*, 18, 524–530. https://doi.org/10.37394/23207.2021.18.53

17. Oklander, M., Yashkina, O., Zlatova, I., Cicekli, I., & Letunovska, N. (2024). Digital marketing in the survival and growth strategies of small and medium-sized businesses during the war in Ukraine. *Marketing and Management of Innovations*, 15(1), 15–28. https://doi.org/10.21272/mmi.2024.1-02

18. Oklander, M., Yashkina, O., Petryshchenko, N., Karandin, O., & Yevdokimova, O. (2024). Economic aspects of Industry 4.0 marketing technologies implementation in the agricultural sector of Ukraine. *Ekonomika APK*, 31(4), 55–66. https://doi.org/10.32317/ekon.apk/4.2024.55

19. Willer, H., Schlatter, B., Trávníček, J., & Schaack, D. (2025). Europe: Statistics. In *The world of organic agriculture: Statistics and emerging trends 2025* (pp. 175–201). FiBL & IFOAM – Organics International.

20. Maloo, A., & Agnihotri, K. (2025). The role of social media marketing in influencing organic food consumers: The power of digital world. *Journal of Marketing & Social Research*, 2(1), 337–341.

21. Ustik, T., Dubovyk, T., Lagodienko, V., Chernobrovkina, S., Vlasenko, Y., & Shmatok, M. (2024). Digital content marketing in brand management of small business enterprises, trading companies and territorial marketing. *Theoretical and Practical Research in Economic Fields*, 15(3), 552–565. https://journals.aserspublishing.eu/tpref/article/view/8587

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 22.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

ПУБЛІЧНЕ УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ

УДК 352 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.47

О. П. ЗУБАЛЬ
здобувач бакалаврського рівня освіти за спеціальністю
281 «Публічне управління та адміністрування»
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0004-5746-7522

РЕАЛІЗАЦІЯ КОНЦЕПЦІЇ GOOD GOVERNANCE В УКРАЇНІ: АНАЛІТИЧНИЙ ЗРІЗ МІЖНАРОДНИХ ІНДЕКСІВ

Робота присвячена комплексному аналізу рівня відповідності системи публічного управління України базовим принципам концепції Good Governance. У центрі дослідження – 12 ключових принципів належного врядування, виділених Радою Європи, які охоплюють питання демократичної участі, прав людини, верховенства права, публічної етики, підзвітності, прозорості, ефективності, лідерства, чутливості до потреб населення, фінансового та економічного управління, сталого розвитку й відкритості до змін. У статті здійснено систематизацію та оцінку 99 індикаторів, що відображають рівень дотримання кожного з принципів. Джерелом інформації стали звіти авторитетних міжнародних організацій, серед яких Freedom House, Світовий банк, Transparency International, V-Dem, Chandler Good Governance Index, Програма розвитку ООН, TRACE International, SolAbility Sustainable Intelligence та інші.

Увага приділена питанням методології оцінювання рівня Good Governance, зазначено на відсутність єдиного уніфікованого набору показників, здатного повною мірою охопити всі 12 принципів. Водночас запропоновано підхід, що поєднує дані різних інституцій у єдиний спосіб оцінювання ефективності та демократичності влади. Підкреслено, що концепція Good Governance не є набором ізольованих цілей, а передбачає цілісність та взаємозв'язок усіх принципів, від чого залежить спроможність держави забезпечувати добробут населення, безпеку та сталий розвиток.

На основі проведеного аналізу сформульовано висновок, що публічне управління України наразі демонструє переважно середній рівень відповідності принципам належного врядування, зі схильністю до асиметричної реалізації окремих з них. Наголошено на необхідності фокусування на підвищенні якості управлінських практик, зокрема в частині прозорості та економічної стабільності, задля забезпечення довгострокової життєздатності української держави у післявоєнний період та її інтеграції до спільного європейського управлінського простору.

Ключові слова: *система публічного управління, концепція Good Governance, принципи належного врядування, демократичність управління, ефективність управління.*

O. P. ZUBAL
Bachelor's Degree Applicant in Specialty 281 "Public Administration"
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0004-5746-7522

IMPLEMENTATION OF GOOD GOVERNANCE CONCEPT IN UKRAINE: AN ANALYTICAL OVERVIEW OF INTERNATIONAL INDICES

The work is devoted to a comprehensive analysis of the level of compliance of the public administration system of Ukraine with the basic principles of the Good Governance concept. The study focuses on 12 key principles of good governance identified by the Council of Europe, which cover issues of democratic participation, human rights, rule of law, public ethics, accountability, transparency, efficiency, leadership, sensitivity to the needs of the population, financial and economic management, sustainable development and openness to change. The article systematizes and evaluates 99 indicators that reflect the level of compliance with each of the principles. The source of information was the reports of authoritative international organizations, including Freedom House, World Bank, Transparency International, V-Dem, Chandler Good Governance Index, United Nations Development Program, TRACE International, SolAbility Sustainable Intelligence and others.

Attention is paid to the issues of the methodology for assessing the level of Good Governance, and the absence of a single unified set of indicators capable of fully covering all 12 principles is noted. At the same time, an approach is proposed that combines data from different institutions into a single way of assessing the effectiveness and democracy of government. It is emphasized that the concept of Good Governance is not a set of isolated goals, but assumes the integrity

© Зубаль О. П., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

and interconnection of all principles, which determines the state's ability to ensure the well-being of the population, security and sustainable development. Based on the analysis, the conclusion is formulated that the public administration of Ukraine currently demonstrates a predominantly average level of compliance with the principles of good governance, with a tendency to asymmetric implementation of some of them. The need to focus on improving the quality of management practices, in particular in terms of transparency and economic stability, is emphasized in order to ensure the long-term viability of the Ukrainian state in the post-war period and its integration into the common European administrative space.

Key words: *public administration system, the concept of Good Governance, principles of good governance, governance democracy, governance efficiency.*

Постановка проблеми

Україна понад 30 років проходить трансформаційний шлях становлення як країна Європейського Союзу. За цей час система публічного управління стикалась з різними викликами: економічний спад після розпаду Радянського Союзу, спроби викорінення недоліків радянської системи влади, війна. Незважаючи на всі складнощі, євроінтеграційний вектор українського суспільства залишався незмінним з огляду на перспективи розвитку та захищеності України, що вартують усіх змін задля виконання вимог членства у Євросоюзі. Вимоги на членство є однаковими для кожного кандидата та базуються на вкоріненій ідеології європейської спільноти, що поєднує в собі цінності демократії та ефективного управління. Наразі найбільш цілісно дану ідеологію відображає концепція Good Governance (належного врядування). Об'єктивна оцінка того, наскільки система публічного управління України функціонує у відповідності з принципами даної концепції, може надати розуміння наявного стану нашої системи управління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Методологічні підходи до вимірювання відповідності системи публічного управління концепції Good Governance вивчали В. Лукошевичене, А. Гуогіс, Е. Померанц, Р. Стедман, Л. Мурсійда, Т. Абаді, Р. Ротберг, М. Безансон, М. Рачковська, А. Мікула, М. Утзіг, М. Акдас та інші.

З огляду на відсутність дослідження, яке б розглядало світові показники відповідності системи публічного управління України кожному принципу даної концепції, що допомагають зрозуміти універсальні світові стандарти того, що і як повинна робити влада, і на якому рівні виконання цих стандартів знаходиться наша система, були визначені тема, мета та проблематика дослідження.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є опис показників відповідності системи публічного управління України концепції Good Governance.

Викладення основного матеріалу дослідження

Одним з найбільш комплексних визначень «системи публічного управління» є 1) сукупність органів державного управління та місцевого самоврядування, що справляють організуючий вплив на суспільні відносини шляхом реалізації управлінських функцій у межах визначеної компетенції на підставі законодавства, а також взаємовідносин між цими органами; 2) сукупність суб'єктів та об'єктів публічного управління, а також взаємовідносин між ними [1, с. 163].

Good Governance як концепція являє собою набір принципів, що поєднують в собі дві основних вимоги – ефективність системи публічного управління (риса Old Public Management) та перевага демократичних цінностей (риса New Public Management). Наразі Рада Європи виділяє 12 принципів Good Governance: демократична участь, права людини, верховенство права, публічна етика, підзвітність, відкритість та прозорість, ефективне, результативне та надійне управління, лідерство, здатність та спроможність, чутливість, надійне фінансове та економічне управління, сталий розвиток та довгострокова орієнтація, відкритість до змін та інновацій [2].

Провідними світовими організаціями, які формують показники щодо того чи іншого аспекту відповідності системи публічного управління концепції Good Governance, є Світовий банк, МВФ, ООН, ПРООН, Transparency International та багато інших. Станом на сьогодні сформовано значну кількість індексів та комплексних оцінок якості функціонування влади майже всіх держав світу як щодо демократичного аспекту, так і щодо їх загальної ефективності. Кожен з цих індексів, рейтингів використовують за джерела даних дослідження перелічених вище організацій як найбільш релевантних, актуальних та надійних. Однак, досі не створено єдиного переліку показників, які б відображали повну відповідність 12 принципам належного врядування через їх абстрактність та широту охоплення діяльності системи публічного управління. Тим не менш, це не заважає поєднати між собою дані тих самих всесвітньо визнаних джерел в узгодженості з кожним принципом задля опису показників відповідності системи публічного управління України концепції Good Governance.

Перший принцип демократичної участі наголошує на регулярних, вільних та чесних виборах до установ публічного управління, інклюзивній участі населення у процесах прийняття рішень та взаємодії влади з громадськістю. Одним з найбільш відомих та надійних джерел, які вивчають рівень демократичності в державах, є американська неурядова правозахисна організація The Freedom House. В рамках її досліджень формуються два критерії: політичні права та громадянські свободи, сума оцінок яких відображає загальний рівень свободи в країні.

Україна станом на 2025 рік оцінена як держава, що надає своїм громадянам часткову свободу (51 бал зі 100, де 100 – абсолютна свобода) [3]. Політичні права оцінені 23 балами з 40 та ставлять Україну на 87 місце зі 188 між іншими країнами (1 місце – найгірший показник, 188 – найкращий) [4], громадянські свободи оцінені 28 балами з 60 та ставлять Україну на 90 місце зі 188 [5].

Звісно, у своєму звіті аналітики The Freedom House наголошують на тому, що велике значення для таких посередніх показників відіграє саме воєнний стан (для порівняння, ще у 2021 році Україна мала 60 балів зі 100, але все ще надавала часткову свободу), згідно з яким, заплановані парламентські та президентські вибори були перенесені, а інші права залишаються обмеженими, і хоча чинна адміністрація запровадила низку позитивних реформ у рамках зміцнення демократичних інституцій, країна все ще бореться з корупцією в уряді, судовій системі та інших секторах. Також слід звернути увагу, що ще останні довоєнні парламентські вибори в Україні 2019 року були розкритиковані як схильні до маніпуляцій та підкупу голосів. Ще одними з негативних акцентів у звіті за 2025 рік організація виділяє ненадійність та неефективність запобіжних заходів проти корупції серед посадовців, зменшення академічної свободи, зменшення свободи політичного самовираження, слабкість незалежності судової системи і її недотримання належної правової процедури у цивільних та кримінальних справах та інші, більш пов'язані саме з особливостями воєнного стану (мала здатність вільно пересуватись, відсутність свободи від насильства і війни тощо) [3].

Ще одним провідним джерелом даних щодо дотримання принципу демократичної участі в країнах є незалежний науково-дослідницький інститут V-Dem (Varieties of Democracy), який насамперед виділяє чотири світові режими правління: ліберальна демократія, електоральна демократія, електоральна автократія та закрита автократія. Україна віднесена до третього типу як електоральна автократія, яка станом на кінець 2024 знаходиться в епізоді подальшої автократизації [6]. Також інститут формує декілька індексів серед 171 країни (0 – найгірший показник, 1 – найкращий показник): станом на кінець 2023 року за індексом електоральної демократії Україна отримала 0,415 бали та посіла 102 місце [7], за індексом ліберальної демократії – 0,249 бали (106 місце) [8], за індексом демократії участі – 0,278 бали (97 місце) [9], за індексом деліберативної або дорадчої демократії – 0,345 бали (90 місце) [10], за індексом егалітарної демократії – 0,307 бали (92 місце) [11], за індексом розширення політичних можливостей жінок – 0,888 бали (40 місце) [12], за індексом чистих виборів – 0,604 бали (82 місце) [13], за індексом участі громадянського суспільства – 0,766 бали (68 місце) [14], за індексом прямого народного голосування – 0,062 (78 місце) [15].

Другий принцип прав людини наголошує на повазі до прав людини, різноманітності та інклюзії в суспільстві всіх людей без виключення, недискримінації, наявності відповідного законодавства щодо захисту прав людини. Дотримання цього принципу досить комплексно оцінює Індекс Good Governance, створений сінгапурською некомерційною організацією Інститутом державного управління Чандлера, використовуючи за джерела бази даних ООН, Міжнародної організації праці, Всесвітнього економічного форуму, Єльського університету та інших інституцій. Одним з критеріїв (всі показники індексовані від 0 до 1, де 0 – найгірший рівень, 1 – найкращий; порівнюються 120 країн) та відповідним правом людини визначено право на освіту, що оцінюється за рівнем грамотності молоді, участі у зайнятості, освіті чи навчанні, кількістю років навчання населення. Показник України становить 0,75 бали та закріплює нас на 56 місці. Право на охорону здоров'я визначається за тим, скільки може розраховувати прожити новонароджена дитина, враховуючи поточні очікування щодо здоров'я та смертності. Показник України становить 0,59 бали та закріплює нас на 87 місці. Право на безпеку оцінюється через здатність держави захищати своїх громадян від насильницьких злочинів, де показник України становить 0,36 бали та закріплює нас на 92 місці. Право на захист екології визначається безпекою та сталим розвитком екосистем та навколишнього середовища країни, де показник України становить 0,66 бали та закріплює нас на 49 місці. Право на працю оцінюється якістю можливостей працевлаштування в країні, де показник України становить 0,55 бали та закріплює нас на 88 місці. Право на рівні можливості жінок та чоловіків оцінюється за ступенем, до якої як жінки, так і чоловіки можуть брати участь в освітніх та економічних можливостях та користуватися ними, де показник України становить 0,86 бали та закріплює нас на 22 місці. Право на свободу від дискримінації, незалежно від соціально-економічного статусу, етнічної приналежності, статі, ідентичності чи віросповідання особи забезпечується Україною на 0,61 бали та закріплює її на 34 місці [16].

До рівня реалізації даного принципу можна також віднести декілька індексів, сформованих згаданим раніше інститутом V-Dem (бали від 0 до 1): за індексом права на свободу самовираження Україна отримала 0,503 бали та посіла 121 місце зі 171 країни [17], за індексом рівного захисту всіх верств населення – 0,669 бали (86 місце) [18]. Право на власність оцінив стратегічний дослідницький інститут США The Heritage Foundation (Фонд «Спадщина»), де Україна отримала 23 бали зі 100 можливих та посіла 160 місце серед 180 країн [19].

Третій принцип верховенства права наголошує на гарантії рівноправного розподілу влади між трьома гілками, переважанні законності, обґрунтованості законодавства та незалежності і чесності судової влади. За згаданим Індексом Good Governance інституту Чандлера, критерій верховенства права оцінюється за тим, чи є закони справедливими та неупередженими, чи дотримується влада належної правової процедури та чи несе вона

відповідальність перед законами, і чи доступне правосуддя для всіх, за яким Україна отримала 0,34 бали (від 0 до 1) та посіла 91 місце зі 120 країн. Критерій якості судової влади оцінюється за тим, чи є суди ефективними та незалежними від зовнішнього впливу, де Україна отримала 0,43 бали та посіла 71 місце [16]. За індексом верховенства права Світового банку Україна отримала -0,89 балів (–2,21 – найгірший показник, 1,97 – найкращий показник) та посіла 152 місце зі 193 країн [20]. За двома індексами від інституту V-Dem (бали від 0 до 1), індексом судових обмежень виконавчої влади та індексом законодавчих обмежень виконавчої влади, Україна отримала 0,3 бали та посіла 122 місце зі 171 країни [21] та 0,595 бали (92 місце) відповідно [22]. Американська неурядова некомерційна дослідницька та навчальна інституція Фонд миру сформувала індекс легітимності держави (0 – найкращий показник, 10 – найгірший показник), у якому Україна отримала 6,3 бали та посіла 89 місце зі 175 країн (175 місце – найкращий показник) [23], та індекс прав людини та верховенства права (0 – найкращий показник, 10 – найгірший показник), у якому Україна отримала 7,5 бали та посіла 45 місце (175 місце – найкращий показник) [24].

Четвертий принцип публічної етики наголошує на службі всіх представників органів публічної влади суспільному благу, якісній системі виявлення і вирішення конфліктів інтересів, надійних заходах боротьби з корупцією, чітких процедурах розгляду скарг щодо порушення публічної етики та впровадженні захисних заходів для викривачів корупції. За індексом сприйняття корупції відомої антикорупційної організації Transparency International Україна отримала 35 балів зі 100 можливих (100 – відсутність корупції) та посіла 105 місце серед 180 країн [25]. За індексом контролю корупції Світового банку (–2,5 – найслабший, 2,5 – найсильніший) Україна отримала –0,69 бали та посіла 139 місце серед 193 країн [26]. За індексом політичної корупції інституту V-Dem (бали від 0 до 1, де 1 – найгірший показник) Україна отримала 0,608 та посіла 69 місце зі 171 країни [27]. За індексом свободи від корупції Фонду «Спадщина» (від 0 до 100, де 100 – найкращий показник) Україна отримала 33 бали та посіла 124 серед 180 країн [28].

П’ятий принцип підзвітності наголошує на запровадженні механізмів підзвітності, які гарантуватимуть притягнення до відповідальності публічних службовців, необхідності звітів, пояснень, перевірок прийнятих рішень в органах влади, наявності ефективних засобів правового захисту у разі неналежних дій або бездіяльності. За індексом голосу та підзвітності Світового банку (–2,5 – найслабший, 2,5 – найсильніший) Україна отримала –0,1 бали та посіла 107 місце серед 192 країн [29]. За індексом урядової підзвітності інституту V-Dem (бали від 0 до 1, де 1 – найгірший показник) Україна отримала 0,505 бали та посіла 100 місце зі 171 країни [30].

Шостий принцип відкритості та прозорості наголошує на публічному доступі до процесів прийняття рішень, впровадженні політик безпосередньо громадян або через представницькі органи, чіткій, точній, всебічній, адаптованій до потреб користувачів інформації, послугах електронного врядування. Американська некомерційна бізнес-асоціація, що займається боротьбою з хабарництвом, дотриманням нормативних вимог та належним врядуванням в державах TRACE International формує матрицю ризиків хабарництва серед 194 країн та порівнює їх за наступними показниками (бали від 0 до 100, де 100 – найгірший показник): взаємодія громадян з урядом, за яким Україна отримала 57 балів; стримування та правозастосування боротьби з хабарництвом, за яким Україна отримала 59 балів; прозорість уряду та публічної влади, за яким Україна отримала 49 балів; рівень цивільного нагляду, за яким Україна отримала 41 бал. Загалом у матриці Україна посіла 109 місце серед 194 країн [31]. Американська неприбуткова організація International Budget Partnership започаткувала відоме дослідження, яке оцінює відкритість бюджетів у 125 країн світу, Open Budget Survey, що вимірює три основних показники (бали від 0 до 100, де 100 – найкращий показник): участь громадськості, за яким Україна отримала 24 бали, бюджетний нагляд, за яким Україна отримала 76 балів, прозорість, за яким Україна отримала 38 балів. У звіті Open Budget Survey по країні акцентується на слабких обсягах можливостей для участі громадськості в бюджетному процесі на всіх його етапах (формулювання, схвалення, впровадження, аудит), адекватному та достатньому законодавчому та аудиторському нагляду за бюджетом, неповноті публічного доступу до основних бюджетних документів, більшість з яких в Україні розробляється лише для внутрішнього використання [32]. За показником прозорості Індексу Good Governance інституту Чандлера (бал від 0 до 1), що відображає публічну доступність до владної інформації, Україна отримала 0,47 бали та посіла 81 місце серед 120 країн [16]. Також за показником відкритості та прозорості The Freedom House Україна має лише 1 з 4 можливих балів та у звіті характеризується як держава з системно низькою прозорістю влади, яка ще більше погіршилась через впровадження воєнного стану, на додачу до цього Національне агентство з питань запобігання корупції (НАЗК) у 2024 році повідомило, що щонайменше половина відібраних оцінених декларацій про активи публічних службовців містила неточну інформацію або докази незаконного збагачення чи необґрунтованих активів [3].

Сьомий принцип ефективного, результативного та надійного управління наголошує на оптимізації використання ресурсів, ефективній координації на всіх рівнях управління, наданні високоякісних публічних послуг, ефективному функціонуванні систем управління на основі заздалегідь визначених цілей та завдань, якісному законодавстві та процедурах управління. Швейцарсько-корейський аналітичний центр та консультаційна компанія у сфері сталого розвитку SolAbility Sustainable Intelligence проводить дослідження серед 191 країни та розробила індекс глобального управління, в рамках якого оцінює комплексність системи управління, інфраструктурне та

бізнес-середовище, фінансову стабільність, за яким Україна отримала 49,05 балів (71,91 – найкращий показник, 25,11 – найгірший) та посіла 88 місце зі 191 [33]. За індексом ресурсоємності та ресурсоефективності, що зосереджений насамперед на ефективності управління енергетичними, водними та сировинними ресурсами, Україна отримала 53,8 балів (59,65 – найкращий показник, 25,58 – найгірший) та посіла 24 місце [34]. В індексі Good Governance інституту Чандлера (бали віл 0 до 1) за показником регуляторного управління, що відображає здатність влади встановлювати чітку та репрезентативну політику та нормативні акти, Україна отримала 0,46 бали та посіла 78 місце серед 120 країн; за показником координації між органами публічної влади, що відображає здатність збалансувати інтереси та цілі, а також забезпечити злагоджену та спільну діяльність публічних установ, Україна отримала 0,47 бали та посіла 24 місце; за показником здатності працювати з даними, що відображає спроможність збирати та використовувати дані, а також надавати якісні цифрові та онлайн-послуги, Україна отримала 0,82 бали та посіла 54 місце; за показником впровадження політик, що відображає ступінь, до якої влада може виконувати власну політику та досягати своїх політичних цілей, Україна отримала 0,42 бали та посіла 43 місце; за показником якості бюрократії, що відображає спроможність та ефективність публічної служби, що не залежить від політичних змін, Україна отримала 0,33 бали та посіла 83 місце [16]. За індексом урядової ефективності Світового банку (–2,5 – найгірший показник, 2,5 – найкращий) Україна отримала –0,36 бали та посіла 117 місце серед 193 країн [35].

Восьмий принцип лідерства, здатності та спроможності наголошує на наявності чіткого бачення розвитку держави, підтримці політики управління людськими ресурсами та розвитку їх потенціалу, створенні необхідних структур та процесів щодо підвищення рівня спроможності держави. За індексом соціального капіталу SolAbility Sustainable Intelligence, що базується на оцінках спроможності систем охорони здоров'я, освіти, захисту від злочинності та загальній задоволеності населення рівнем життя в державі, Україна отримала 46,51 балів (64,99 – найкращий показник, 24,19 – найгірший показник) та посіла 60 місце серед 191 країни [36]. Згідно з індексом Good Governance інституту Чандлера (бали віл 0 до 1), оцінюючи спроможності до глобального впливу та рівня репутації держави, за показником міжнародної торгівлі, що відображає свободу, доступ та можливості купувати та продавати товари та послуги за межами національних кордонів, Україна отримала 0,52 бали та посіла 50 місце серед 120 країн; за показником міжнародної дипломатії, що відображає загальні міжнародні відносини країни та її дипломатичне представництво за кордоном, Україна отримала 0,39 бали та посіла 36 місце; за показником національного бренду, що відображає узгодженість національного просування туризму країни, її імідж і привабливість для різноманітних некомерційних зацікавлених сторін, Україна отримала 0,4 бали та посіла 77 місце; за показником сили паспорту, що відображає довіру до паспорта країни та вимірюється кількістю безвізових режимів, якими користуються власники паспортів у всьому світі, Україна отримала 0,72 бали та посіла 50 місце [16]. За індексом людського розвитку ООН (бали від 0 до 1, де 1 – найкращий показник) Україна отримала 0,779 бали та посіла 85 місце серед 184 країн [37]. Індекси Фонду миру (0 – найкращий показник, 10 – найгірший) демонструють серйозні проблеми, які привнесла з собою війна: за індексом зовнішніх утручань у внутрішні справи Україна отримала 9,7 балів та посіла 5 місце серед 175 країн [38]; за індексом виїзду людей та «відтоку мізків» з держави Україна отримала 8,4 балів та посіла 7 місце [39]; за індексом біженців та переміщених осіб Україна отримала 9,5 балів та посіла 5 місце [40]. За Всесвітнім звітом про щастя (World Happiness Report), що готується Мережею рішень сталого розвитку ООН, Україна отримала 4,87 балів (0 – найгірший показник, 10 – найкращий) та посіла 102 місце серед 138 країн [41].

Дев'ятий принцип чутливості наголошує на ефективному реагуванні представників влади на законні очікування та потреби населення, системності визначення та інтеграції в плани діяльності людських потреб, наявності механізмів для подання скарг та взаємодії з публічними інституціями, своєчасній обробці скарг та звернень. Згідно з індексом Good Governance інституту Чандлера (бали віл 0 до 1), за показником задоволеності публічними послугами, що відображає задоволеність громадським транспортом, інфраструктурою та освітою, Україна отримала 0,47 бали та посіла 82 місце зі 120 [16]. В індексі нестабільного стану держави, розробленому Фондом миру, за показником групових скарг, що зосереджується на розбіжностях та розколах між різними групами в суспільстві, зокрема на розбіжностях, заснованих на соціальних чи політичних характеристиках, та їхній ролі в доступі до послуг чи ресурсів, а також на включенні до політичного процесу, Україна отримала 7,1 балів (0 – найкращий показник, 10 – найгірший) та посіла 55 місце серед 175 країн (1 місце – найгірший показник) [42]. За показником якості надання публічних послуг, що стосується наявності основних публічних функцій, що служать народу, Україна отримала 7 балів та посіла 58 місце [43].

Десятий принцип надійного фінансового та економічного управління наголошує на економічній та фінансовій політиці, що чітко пов'язані з усіма планами та стратегіями задля довгострокового економічного зростання та спільного добробуту, справедливому розподілі витрат і доходів, зменшенні ризиків, значущості внутрішніх та зовнішніх аудитів. Відповідно до індексу Good Governance інституту Чандлера (бали віл 0 до 1), оцінюючи якість фінансового й економічного управління та привабливість ринку, за показником державного боргу, що відображає здатність влади стабільно управляти своїм боргом, Україна отримала 0 балів та посіла 115 місце серед 120 країн;

за показником профіциту бюджету в країні, що відображає середній показник доходів і витрат влади, що базується на її бюджетному балансі, протягом 5-річного періоду, Україна отримала 0,03 бали та посіла 118 місце; за показником ефективності витрат, що відображає ступінь, до якої державні витрати перетворюються на результати та послуги з мінімальними втратами, Україна отримала 0,49 балів та посіла 68 місце; за показником ступеня ризику інвестування в державу, що відображає її здатність погашати суверенний борг та ефективність економічного управління, Україна отримала 0,16 бали та посіла 115 місце; за показником майнових прав, що відображає ступінь, до якої встановлені та захищені законні права володіння та використання фізичної та інтелектуальної власності, Україна отримала 0,28 бали та посіла 102 місце; за показником залучення інвестицій, що відображає здатність залучати іноземні внутрішні інвестиції, Україна отримала 0,55 бали та посіла 78 місце; за показником логістичної компетенції, що відображає якість логістичної інфраструктури та систем у країні, Україна отримала 0,27 бали та посіла 77 місце; за показником стабільного регулювання підприємницької діяльності, що відображає стабільність політики та правил щодо підприємницької діяльності, Україна отримала 0,33 бали та посіла 98 місце; за показником розподілу доходів, що відображає рівномірність розподілу доходів серед населення, Україна отримала 0,88 балів та посіла 8 місце; за показником цінової стабільності, що відображає рівень та коливання інфляції, Україна отримала 0,86 бали та посіла 102 місце [16].

Згідно з індексом економічного капіталу та економічної сталості, розробленим SolAbility Sustainable Intelligence, що базується на показниках сталості бізнес-середовища, конкурентоспроможності бізнесу, рівності участі статей в економічних процесах, фінансових ринків, основних економічних індикаторах, Україна отримала 45,2 балів (найкращий показник – 60,22, найгірший – 25,48) та посіла 68 місце серед 191 країни [44]. Згідно з глобальним опитуванням щодо впевненості бізнесу, розробленим всесвітньою організацією International Trade Council (Міжнародна торгова рада), що являє собою опитування щодо рівня оптимізму чи песимізму, який керівники підприємств відчувають щодо перспектив своїх компаній, на основі громадської думки щодо розвитку виробництва, замовлень та запасів готової продукції, а також загального економічного стану компаній, показник впевненості українського бізнесу дорівнює –5,84 (найгірший показник – –33,8, найкращий – 118) [45]. Рівень впевненості споживачів в Україні оцінили у –30,6 (найгірший показник – –53,4, найкращий – 137) [46]. За індексом економічного спаду від Фонду миру (0 – найкращий показник, 10 – найгірший) Україна отримала 8 балів та посіла 26 місце серед 175 країн (1 місце – найгірший показник) [47]. За індексом нерівномірності економічного розвитку Україна отримала 4,6 балів та посіла 107 місце [48]. Згідно з прогнозом Міжнародного валютного фонду (IMF) до 2030 року рівень інфляції в Україні зросте на 9 %, що ставить нас на 22 місце зі 184 країн (1 місце – найгірший показник) [49]; прогнозований ріст економіки складає 2 %, що ставить нас на 132 місце (184 місце – найгірший показник) [50]; прогнозований ріст інвестицій складає 18,46 %, що ставить нас на 130 місце (184 місце – найгірший показник) [51]; прогнозований рівень безробіття складає 11,57 %, що ставить нас на 8 місце (1 місце – найгірший показник) [52]; прогнозований сальдо поточного рахунку складає –7,05 %, що ставить нас на 156 місце (184 місце – найгірший показник) [53].

Одинадцятий принцип сталого розвитку та довгострокової орієнтації наголошує на поточних політиках та процесах прийняття рішень, що враховують рівність всіх поколінь громадян, потенційний вплив на сучасний і майбутній розвиток, прагнуть зберегти історичні, культурні та суспільні особливості держави, запроваджених ефективних процесах стратегічного планування, що розробляються поза межами виборчих циклів. Відповідно до індексу Good Governance інституту Чандлера (бали віл 0 до 1), за показником довгострокового бачення, що відображає здатність розробляти та виражати бажані цілі та напрямки розвитку країни протягом тривалішого періоду часу, Україна отримала 0,45 бали та посіла 68 місце серед 120 країн; за показником стратегічного визначення пріоритетів, що відображає розробку довгострокових планів та структур прийняття рішень, що зосереджені на важливих цілях та результатах, Україна отримала 0,42 бали та посіла 43 місце [16]. За глобальним індексом сталої конкурентоспроможності держав SolAbility Sustainable Intelligence, що визначає загальну національну ефективність та перспективи на майбутнє, Україна отримала 47,73 балів (61,22 – найкращий показник, 30,75 – найгірший) та посіла 47 місце серед 191 країни. У своєму звіті організація акцентує увагу на тому, що стійка конкурентоспроможність передбачає насамперед аналіз довгострокових можливих результатів заходів для виходу з криз і збільшення, а не зменшення, вкладень у фундаментальні сектори розвитку: освіту, інновації. Звичайні скорочення витрат бюджету також скорочують і необхідну базу для запуску зростання, необхідно проводити розрахунок як скорочень, так і вартості цих скорочень в майбутньому [54]. За індексом нестабільності стану держав, розробленим Фондом миру, Україна отримала 93,1 бали (0 – найкращий показник, 120 – найгірший) та посіла 22 місце серед 175 країн (1 місце – найгірший показник) [55]. За індексом демографічного тиску, що вираховує тиск на державу, що виникає з боку самого населення або навколишнього середовища, Україна отримала 7 балів (0 – найкращий показник, 10 – найгірший) та посіла 66 місце [56].

Дванадцятий принцип відкритості до змін та інновацій наголошує на готовності системи публічного управління проактивно приймати зміни та інновації, що покращать стійкість та якість публічних послуг, сприятливому до адаптації внутрішньому кліматі органів влади, участі в обміні знаннями на всіх рівнях управління, включно

з міжнародним, здатності впроваджувати успішні практики інновацій, коли це необхідно. Згідно з індексом Good Governance інституту Чандлера (бали віл 0 до 1), за показником адаптивності, що відображає здатність влади реагувати на різні тенденції та зміни за допомогою відповідних стратегій, політик та дій, Україна отримала 0,54 бали та посіла 50 місце серед 120 країн; за показником інновацій, що відображає здатність до навчання, а також генерування, адаптація та застосування ідей владою, Україна отримала 0,58 бали та посіла 8 місце [16]. За індексом інтелектуального та інноваційного капіталу SolAbility Sustainable Intelligence, що вимірює якість рівня освіти, показники щодо розвитку досліджень та розробок і відкриття інноваційного бізнесу в державі, Україна отримала 41,36 бали (77,86 – найкращий показник, 10,74 – найгірший) та посіла 80 місце серед 191 країни [57]. За Глобальним інноваційним індексом, розробленим Всесвітньою організацією інтелектуальної власності (WIPO), що вимірює інноваційні досягнення 133 держав світу, Україна отримала 29,5 балів (бали від 0 до 100) та посіла 60 місце [58]. Згідно з опитуванням щодо якості та розвинутості електронного врядування (бали від 0 до 1), що проводиться ООН серед 193 держав, за індексом розвитку електронного врядування Україна отримала 0,88 бали та посіла 30 місце; за індексом електронної участі населення Україна отримала найвищий 1 бал та посіла 1 місце в світі; за індексом онлайн послуг – 0,99 бали; за індексом телекомунікаційної інфраструктури – 0,84 бали; за індексом людського капіталу – 0,82 бали [59].

Вище було наведено, сумарно на 12 принципів, 99 показників (1 – 13; 2 – 10; 3 – 7; 4 – 4; 5 – 2; 6 – 8; 7 – 8; 8 – 10; 9 – 3; 10 – 20; 11 – 5; 12 – 9), розроблені 14-ма визнаними всесвітніми організаціями (The Freedom House, V-Dem, Світовий банк, Chandler Good Governance Index, The Heritage Foundation, Фонд миру, Transparency International, TRACE International, International Budget Partnership, SolAbility Sustainable Intelligence, ООН, International Trade Council, Всесвітня організація інтелектуальної власності, МВФ). Усі принципи є взаємопов'язаними, тому майже кожен з використаних показників можна застосувати одразу для характеристики декількох принципів.

Слід наголосити, що досягнення максимально можливого рівня показників не є самоціллю. Безпосередньою метою функціонування будь-якої системи публічного управління є забезпечення належного рівня життєдіяльності та благополуччя населення, якого неможливо досягти без дотримання принципів Good Governance, через що, вже як наслідок, показники стають важливими задля оцінки поточного успіху та планування подальших необхідних змін.

Висновки

Роблячи загальний висновок щодо відповідності системи публічного управління України концепції Good Governance, справедливо відмітити, що наша система демонструє адекватні показники по всім принципам, знаходячись найчастіше на посередньому чи трохи вище/нижче середнього рівнях їх дотримання. Найкращими показниками є розвиненість та широта використання інструментів електронного врядування. Найгірші показники (якість економічного управління, виїзд населення) все ж здебільшого можна пояснити війною, непідготованістю системи до неї, але системними були та залишаються показники непрозорості та корумпованості управління. На даний блок проблем особливо доречно звернути увагу, оскільки слід ще раз нагадати, що жоден з принципів не існує окремо від іншого. Абсолютно хибною буде думка «достатності» виконання одних принципів і невиконання інших: не вирішуючи питання вад управління, що призводять до його низької якості, та не розглядаючи їх наслідки в довгостроковій перспективі, українська система публічного управління залишається вразливою до ризиків, гальмує свій розвиток та зміцнення позиції на світовій арені.

Звісно, підтримувати виконання кожного принципу на однаково високому рівні є ідеалістичною та навіть утопічною ціллю, у реальності країни під час свого становлення скоріше формують, так би мовити, «політику вирівнювання» у дотриманні концепції належного врядування, балансуючи між показниками демократичності та ефективності влади, які лежать в основі Good Governance. Лише деяким державам вдається досягти майже ідеального рівня дотримання кожного принципу концепції. У випадку України, допоки владою не запропоноване чітке бачення нашого майбутнього та, на базі якого, не розроблено чітких цілей для його досягнення, доцільно було б сконцентруватись на підвищенні показників ефективності управління.

Список використаної літератури

1. Публічне управління : термінол. слов. / уклад. : В. С. Куйбіда, М. М. Білинська, О. М. Петроє та ін. ; за заг. ред. В. С. Куйбіди, М. М. Білинської, О. М. Петроє. Київ : НАДУ, 2018. 224 с.

2. 12 Principles of Good Democratic Governance. Council of Europe. URL: https://www.coe.int/en/web/centre-of-expertise-for-multilevel-governance/12-principles

3. Ukraine: Freedom in the World 2025 Country Report. Freedom House. URL: https://freedomhouse.org/country/ukraine/freedom-world/2025

4. Political rights by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/political_rights/

5. Civil liberties by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/civil_liberties/

6. Democracy Reports 2025. V-Dem. URL: https://v-dem.net/publications/democracy-reports/
7. Electoral democracy index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/electoral_democracy_index/
8. Liberal democracy index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/liberal_democracy_index/
9. Participatory democracy index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/participatory_democracy_index/
10. Deliberative democracy index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/deliberative_democracy_index/
11. Egalitarian democracy index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/egalitarian_democracy_index%20/
12. Women political empowerment by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/women_political_empowerment_index/
13. Clean elections index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/clean_elections_index/
14. Civil society participation index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/civil_society_participation_index/
15. Direct popular vote index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/direct_vote_index/
16. Ukraine. Chandler Good Governance Index. URL: https://chandlergovernmentindex.com/countries/ukraine/
17. Freedom of expression by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/freedom_of_expression/
18. Equal protection index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/equal_protection_index/
19. Property rights by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/herit_property_rights/
20. Rule of law by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/wb_ruleoflaw/
21. Judicial constraints on executive by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/judicial_constraints_on_executive/
22. Legislative constraints on executive by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/legislative_constraints_on_executive/.
23. State legitimacy index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/state_legitimacy_index/
24. Human rights and rule of law index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/human_rights_rule_law_index/
25. Corruption Perceptions Index – Ukraine. Transparency International. URL: https://www.transparency.org/en/cpi/2024/index/ukr
26. Control of corruption by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/wb_corruption/
27. Political corruption by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/political_corruption_index/
28. Freedom from corruption by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/herit_corruption/
29. Voice and accountability by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/wb_voice_accountability/
30. Government accountability by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/government_accountability/
31. TRACE Bribery Risk Matrix | View Country Risk Scores. TRACE | Compliance Powered by Community. URL: https://www.traceinternational.org/trace-matrix
32. Open Budget Survey Ukraine 2023. International Budget Partnership. URL: https://internationalbudget.org/open-budget-survey/country-results/2023/ukraine
33. The Global Governance Index. SolAbility Sustainable Intelligence. URL: https://solability.com/the-global-sustainable-competitiveness-index/governance-capital
34. Global Resource Intensity Index. SolAbility Sustainable Intelligence. URL: https://solability.com/the-global-sustainable-competitiveness-index/resource-intensity-index

35. Government effectiveness by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/wb_government_effectiveness/
36. Social Capital Index. SolAbility Sustainable Competitiveness. URL: https://solability.com/the-global-sustainable-competitiveness-index/social-capital
37. Human development by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/human_development/
38. External interventions index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/external_interventions_index/
39. Human flight and brain drain by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/human_flight_brain_drain_index/
40. Refugees and displaced persons index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/refugees_displaced_persons_index/
41. Happiness index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/happiness/
42. Group grievance index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/group_grievance_index/
43. Public services index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/public_services_index/
44. Economic Capital Index. SolAbility Sustainable Intelligence. URL: https://solability.com/the-global-sustainable-competitiveness-index/economic-sustainability-index
45. Business confidence survey around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/business_confidence_survey/
46. Consumer confidence around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/consumer_confidence_survey/
47. Economic decline index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/economic_decline_index/
48. Uneven economic development by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/uneven_economic_development_index/
49. Inflation forecast by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/inflation_outlook_imf/
50. Economic growth forecast by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/gdp_growth_outlook_imf/
51. Investment forecast by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/investment_outlook/
52. Unemployment rate forecast by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/unemployment_outlook/
53. Current account forecast by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/current_account_outlook/
54. The Global Sustainable Competitiveness Index. SolAbility Sustainable Intelligence. URL: https://solability.com/the-global-sustainable-competitiveness-index
55. Global Data | Fragile States Index. The Fund for Peace. URL: https://fragilestatesindex.org/global-data/
56. Demographic pressures index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/demographic_pressures_index/
57. Intellectual capital and innovation index. SolAbility Sustainable Intelligence. URL: https://solability.com/the-global-sustainable-competitiveness-index/intellectual-capital
58. Global Innovation Index 2024. World Intellectual Property Organization (WIPO). URL: https://www.wipo.int/web-publications/global-innovation-index-2024/en/
59. Ukraine | UN E-Government Survey 2024. The United Nations E-Government Knowledgebase (UNeGovKB). URL: https://publicadministration.un.org/egovkb/en-us/Data/Country-Information/id/180-Ukraine

References

1. Kuibida, V. S., Bilynska, M. M., Petroie, O. M. (Eds.). (2018). Publichne upravlinnia: Terminolohichnyi slovnyk [Public administration: Terminological dictionary]. Kyiv: NADU. (in Ukrainian).
2. 12 Principles of Good Democratic Governance. Council of Europe. URL: https://www.coe.int/en/web/centre-of-expertise-for-multilevel-governance/12-principles
3. Ukraine: Freedom in the World 2025 Country Report. Freedom House. URL: https://freedomhouse.org/country/ukraine/freedom-world/2025

4. Political rights by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/political_rights/
5. Civil liberties by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/civil_liberties/
6. Democracy Reports 2025. V-Dem. URL: https://v-dem.net/publications/democracy-reports/
7. Electoral democracy index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/electoral_democracy_index/
8. Liberal democracy index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/liberal_democracy_index/
9. Participatory democracy index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/participatory_democracy_index/
10. Deliberative democracy index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/deliberative_democracy_index/
11. Egalitarian democracy index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/egalitarian_democracy_index%20/
12. Women political empowerment by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/women_political_empowerment_index/
13. Clean elections index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/clean_elections_index/
14. Civil society participation index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/civil_society_participation_index/
15. Direct popular vote index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/direct_vote_index/
16. Ukraine. Chandler Good Governance Index. URL: https://chandlergovernmentindex.com/countries/ukraine/
17. Freedom of expression by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/freedom_of_expression/
18. Equal protection index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/equal_protection_index/
19. Property rights by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/herit_property_rights/
20. Rule of law by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/wb_ruleoflaw/
21. Judicial constraints on executive by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/judicial_constraints_on_executive/
22. Legislative constraints on executive by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/legislative_constraints_on_executive/
23. State legitimacy index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/state_legitimacy_index/
24. Human rights and rule of law index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/human_rights_rule_law_index/
25. Corruption Perceptions Index - Ukraine. Transparency International. URL: https://www.transparency.org/en/cpi/2024/index/ukr
26. Control of corruption by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/wb_corruption/
27. Political corruption by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/political_corruption_index/
28. Freedom from corruption by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/herit_corruption/
29. Voice and accountability by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/wb_voice_accountability/
30. Government accountability by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/government_accountability/
31. TRACE Bribery Risk Matrix | View Country Risk Scores. TRACE | Compliance Powered by Community. URL: https://www.traceinternational.org/trace-matrix
32. Open Budget Survey Ukraine 2023. International Budget Partnership. URL: https://internationalbudget.org/open-budget-survey/country-results/2023/ukraine

33. The Global Governance Index. SolAbility Sustainable Intelligence. URL: https://solability.com/the-global-sustainable-competitiveness-index/governance-capital
34. Global Resource Intensity Index. SolAbility Sustainable Intelligence. URL: https://solability.com/the-global-sustainable-competitiveness-index/resource-intensity-index
35. Government effectiveness by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/wb_government_effectiveness/
36. Social Capital Index. SolAbility Sustainable Competitiveness. URL: https://solability.com/the-global-sustainable-competitiveness-index/social-capital
37. Human development by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/human_development/
38. External interventions index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/external_interventions_index/
39. Human flight and brain drain by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/human_flight_brain_drain_index/
40. Refugees and displaced persons index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/refugees_displaced_persons_index/
41. Happiness index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/happiness/
42. Group grievance index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/group_grievance_index/
43. Public services index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/public_services_index/
44. Economic Capital Index. SolAbility Sustainable Intelligence. URL: https://solability.com/the-global-sustainable-competitiveness-index/economic-sustainability-index
45. Business confidence survey around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/business_confidence_survey/
46. Consumer confidence around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/consumer_confidence_survey/
47. Economic decline index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/economic_decline_index/.
48. Uneven economic development by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/uneven_economic_development_index/
49. Inflation forecast by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/inflation_outlook_imf/
50. Economic growth forecast by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/gdp_growth_outlook_imf/
51. Investment forecast by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/investment_outlook/
52. Unemployment rate forecast by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/unemployment_outlook/
53. Current account forecast by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/current_account_outlook/
54. The Global Sustainable Competitiveness Index. SolAbility Sustainable Intelligence. URL: https://solability.com/the-global-sustainable-competitiveness-index
55. Global Data | Fragile States Index. The Fund for Peace. URL: https://fragilestatesindex.org/global-data/
56. Demographic pressures index by country, around the world. TheGlobalEconomy.com. URL: https://www.theglobaleconomy.com/rankings/demographic_pressures_index/
57. Intellectual capital and innovation index. SolAbility Sustainable Intelligence. URL: https://solability.com/the-global-sustainable-competitiveness-index/intellectual-capital
58. Global Innovation Index 2024. World Intellectual Property Organization (WIPO). URL: https://www.wipo.int/web-publications/global-innovation-index-2024/en/
59. Ukraine | UN E-Government Survey 2024. The United Nations E-Government Knowledgebase (UNeGovKB). URL: https://publicadministration.un.org/egovkb/en-us/Data/Country-Information/id/180-Ukraine

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 20.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 94(477):332.025.26 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.48

Я. І. МАНДРИК
доктор історичних наук,
професор кафедри суспільних наук
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0001-6663-4880

СУЧАСНІ ПІДХОДИ У ФОРМУВАННІ УПРАВЛІНЦІВ НАФТОГАЗОВОЇ ІНДУСТРІЇ УКРАЇНИ

У статті проаналізовано процеси підготовки кадрів управлінців для нафтогазової індустрії України в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу та в Дрогобицькому коледжі нафти і газу. Проаналізовано роботу 12-ти факультетів денної форми навчання, факультету заочного та дистанційного навчання, факультету навчання іноземних студентів, 57 кафедр, із них 33 –випускні. Аналізується нова форма навчання – екстернатура. Напрями підготовки та спеціальності були ліцензовані та акредитовані за відповідними рівнями. Розкрито систему підготовки бакалаврів за 14-а галузями знань та 23-а напрямами. В університеті створено нові кафедри, значно зріс контингент студентів. Збільшився випуск фахівців. Вдосконалено навчальний процес, для цього проводились науково-методичні конференції. Навчальний процес здійснювався за ступеневою схемою підготовки фахівців на основі освітньо-професійних програм (ОПП) та освітньо-кваліфікаційних характеристик (ОКХ) на основі державних галузевих стандартів підготовки фахівців. Змінювались робочі навчальні програми, беручи до уваги особливості здійснення навчального процесу за кредитно-модульною системою та із врахуванням змін у робочих навчальних планах. Осодлива увага приділялась підготовці фахівців нафтогазового комплексу України. Була налагоджена тісна співпраця між освітнім процесом, наукою та бізнесом. В університеті запроваджена кредитно-модульна система організації навчального процесу (КМСОНП). Вплинула на підвищення якості підготовки фахівців запроваджена у ці роки рейтингова система контролю знань студентів. Позитивно зарекомендувала себе тестова система оцінювання знань студентів. Важливе місце займає організація працевлаштування спеціалістів у системі нафтогазового комплексу України. Особливе місце у підготовці кадрів управлінців займає науковий потенціал ІФНТУНГ та система роботи викладацьких кадрів університету. Чисельність із науковими ступенями перевищила 80 %. 14 науково-педагогічних працівників університету стали лауреатами Державної премії України в галузі науки і техніки. Ректор університету Кризанівський Є. І. отримав звання академіка НАН України. В університеті функціонували 6 спеціалізованих вчених рад із захисту кандидатських за 9-а спеціальностями і докторських дисертацій – за 6-а спеціальностями.

Ключові слова: *кадри, нафтогазовий комплекс, вищий навчальний заклад, коледж.*

YA. I. MANDRYK
Doctor of Historical Sciences,
Professor at the Department of Social Sciences
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0001-6663-4880

MODERN APPROACHES IN FORMING MANAGERS OF THE OIL AND GAS INDUSTRY OF UKRAINE

The article analyzes the processes of training managers for the oil and gas industry of Ukraine at the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas and at the Drohobych College of Oil and Gas. The work of 12 full-time faculties, the faculty of correspondence and distance learning, the faculty of foreign students, and 57 departments, 33 of which are graduate departments, was analyzed. A new form of study – externship – is being analyzed. Areas of training and specialties were licensed and accredited at the appropriate levels. A system of bachelor's training in 14 fields of knowledge and 23 areas was opened. New departments were created at the university, and the number of students increased significantly. The number of graduates increased. The educational process was improved, for this purpose scientific and methodological conferences were held. The educational process was carried out according to a step-by-step scheme of training specialists based on educational and professional programs (EPP) and educational and qualification characteristics (ECC) based on state industry standards for training specialists. The working curricula were changed, taking into account the peculiarities of the educational process according to the credit-modular system and taking into account changes in the working curricula. Particular attention was paid to the training of specialists of the oil and gas complex of Ukraine. Close cooperation was established between the educational process, science and business. The university has introduced a credit-modular system for organizing the educational process (CMSONP). The

© Мандрик Я. І., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

rating system for controlling students' knowledge, introduced in recent years, has contributed to improving the quality of training specialists. The test system for assessing students' knowledge has proven itself positively. An important place is occupied by the organization of employment of specialists in the system of the oil and gas complex of Ukraine. A special place in the training of managers is occupied by the scientific potential of IFNTUNG and the system of work of the university's teaching staff. The number of students with scientific degrees exceeded 80 %. 14 scientific and pedagogical workers of the university became laureates of the State Prize of Ukraine in the field of science and technology. The rector of the university, Kryzhanivskyi E.I., received the title of academician of the National Academy of Sciences of Ukraine. The university had 6 specialized academic councils for the defense of candidate theses in 9 specialties and doctoral theses in 6 specialties.

Key words: *personnel, oil and gas complex, higher education institution, college.*

Постановка проблеми

Нафтогазовий комплекс незалежної України постійно вимагає сучасних фахівців із вищою спеціальною освітою. Цю проблему зобов'язані вирішувати створений у 2001 р. на базі Івано-Франківського державного технічного університету нафти і газу аналогічний за спеціалізацією національний університет (ІФНТУНГ) та Дрогобицький коледж нафти і газу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблема підготовки кадрів управлінців для нафтогазового комплексу України в ІФНТУНГ та Дрогобицькому коледжі нафти і газу на сьогоднішній день спеціально не досліджувалась, тому основний масив статті побудований на архівних джерелах нашого університету.

Формування мети дослідження

Опираючись на архівні матеріали, автор поставив за мету розкрити вищеназвану проблему, особливо використовуючи сучасні наукові підходи незалежної Української держави.

Викладення основного матеріалу дослідження

Аналізуючи діяльність ІФНТУНГ із підготовки кадрів управлінців для нафтогазового комплексу України на сучасному етапі розвитку Української держави необхідно підкреслити, що у 2001 році Указом Президента України № 591 від 07.08.2001 р. нашому університету надано статус національного.

Цей період характерний суттєвими досягненнями у підготовці фахівців нафтогазового комплексу України. Зокрема, за час створення університету було підготовлено їх понад 45 тис. осіб [1].

У структурі університету функціонувало 12 факультетів денної форми навчання, факультет заочного та дистанційного навчання, факультет навчання іноземних студентів, 57 кафедр, з яких 33 – випускні [2].

Підготовка фахівців здійснювалась за денною, заочною, дистанційною та екстернатною формами навчання за 28 спеціальностями (у порівнянні з 2003 роком їх було 24), згідно Переліку – 1997 [3]. Напрями підготовки та спеціальності були ліцензовані та акредитовані за відповідними рівнями (ліцензія про надання освітніх послуг: серія АВ № 395466 видана 2008 р. та сертифікат про акредитацію: серія РД – IV № 090177 виданий 01.04.2009 р.) [4].

За період 2003–2010 рр. було ліцензовано 8 спеціальностей, та акредитовано за відповідним рівнем – 8 спеціальностей [5].

Згідно з постановою Кабінету Міністрів України від 13 грудня 2006 року № 1719 «Про перелік напрямів, за якими здійснюється підготовка фахівців у вищих навчальних закладах за освітньо-кваліфікаційним рівнем бакалавра» та наказу ректора університету від 23 березня 2007 року № 30 підготовка бакалаврів в університеті здійснювалась за 14 галузями знань та 23 напрямами підготовки.

Зросла чисельність підготовлених фахівців із 1950 у 2003 році до 2260 у 2009 році (бакалаври), із 1685 – до 1919 (спеціалісти) та із 195 – до 216 (магістри) [6].

За ті роки відбулися важливі структурні зміни в університеті. Були створені нові кафедри, які розширили можливості ІФНТУНГ із підготовки кадрів для нафтогазового комплексу України, це – технічної діагностики та моніторингу, зварювання трубопроводів і конструкцій, фізики новітніх технологій, програмного забезпечення автоматизованих систем, комп'ютерних систем і мереж [7].

Значно зріс контингент студентів. Так якщо у 2002 / 2003 н.р. він становив 9338 осіб, то у 2008 / 2009 н.р. – 10644 студентів, з яких 7114 (66, %) – на денній, 3530 (33,2 %) – на заочній формі навчання [8].

Зріс випуск фахівців із 1205 осіб, до 2103 осіб. Всього за ці роки підготовлено 13 207 фахівців із вищою освітою [9].

Значна увага ректора та університету була зосереджена на вдосконаленні навчального процесу. Із цією метою дуже активно проводилися науково-методичні конференції, всього їх було проведено 10, із них – «Стан і перспективи розвитку бурових робіт та підготовки фахівців для нафтогазової галузі України» – 19–21 вересня 2003 р., «Стан і перспективи розробки родовищ нафти і газу України» – 18 листопада 2003 р., «Реалії, проблеми та перспективи розвитку інженерної освіти» – 16–17 грудня 2003 р. та ін.

Навчальний процес в університеті здійснювався за ступеневою схемою підготовки фахівців на основі освітньо-професійних програм (ОПП) та освітньо-кваліфікаційних характеристик (ОКХ) за освітньо-кваліфікаційними рівнями «бакалавр», «спеціаліст», «магістр» на основі державних галузевих стандартів підготовки фахівців.

За ці роки в перелік напрямів підготовки фахівців за освітньо-кваліфікаційним рівнем бакалавр (2006 р.) введено напрям підготовки «Нафтогазова справа» (6.050304) галузі знань «Розробка корисних копалин» (0503). Із 2007 / 2008 н.р. введено нові робочі навчальні програми для набору студентів 2007 року [10].

Робочі програми для всіх дисциплін переглядались і доповнювались у 2005 році, виходячи із особливостей здійснення навчального процесу за кредитно-модульною системою згідно Болонської декларації, та щорічно із врахуванням змін у робочих навчальних планах.

Особлива увага приділялась фундаментальній підготовці фахівців для нафтогазового комплексу України. Фундаменталізація освіти в університеті забезпечувалася через посилення ролі природничих, математичних дисциплін під час вивчення професійно-орієнтованих і спеціальних дисциплін. Важливу роль у цьому відігравав створений у структурі університету інститут фундаментальної, гуманітарної підготовки та заочно-дистанційного навчання, а також оновлення робочих навчальних програм (РНП) підготовки бакалаврів. В них передбачено отримання базової фундаментальної та гуманітарної підготовки, в основному, протягом перших 2–3 років навчання.

Аналізуючи РНП усіх напрямів підготовки у ті роки, відмічаємо, що фундаментальні та професійно-орієнтовані дисципліни складали у них від 43 % до 50 % від загального обсягу [11].

Велика увага колективом університету приділялась підвищенню якості підготовки фахівців на виконання Указу Президента України від 25.09.2008р. № 857 «Про забезпечення дальшого розвитку вищої освіти в Україні». Зокрема налагоджувалась тісна взаємодія між освітою, наукою і бізнесом, активізувалась участь університету у міжнародних проектах. Удосконалювалась система цільової підготовки фахівців у межах державного контракту для задоволення потреб пріоритетних галузей, що фінансуються із державного бюджету (в першу чергу для базових галузей промисловості: агропромислового та паливно-енергетичного комплексу).

Із 2004 / 2005 н.р. в університеті запроваджено кредитно-модульну систему організації навчального процесу (КМСОНП). Спочатку в рамках педагогічного експерименту для напряму підготовки 0903. Гірництво для спеціальностей «Видобування нафти і газу», «Буріння», «Газонафтопроводи і газонафтосховища». Із початком 2006 / 2007 н. р. КМСОНП впроваджена для всіх студентів першого курсу [12].

Значний вплив на підвищення якості підготовки фахівців для нафтогазового комплексу України має, запроваджена у ті роки, рейтингова система контролю знань студентів. Оцінювання знань студентів та їх рейтинг здійснюється на основі «Положення про систему поточного і підсумкового контролю, оцінювання знань та визначення рейтингу студентів», яке введено наказом ректора від 22.03.2006 р. № 21 на виконання ухвали вченої Ради університету від 15.03.2006 р. «Про удосконалення рейтингового контролю знань студентів».

Позитивно зарекомендувала себе тестова система оцінювання знань студентів. Набутий за роки досвід показує, що використання тестового контролю знань як у процесі вивчення програмового матеріалу, так і при підсумковому контролі підвищує ефективність засвоєння навчального матеріалу. Із 2008 / 2009 н.р. тестовий контроль знань студентів в екзаменаційних сесіях проводиться з усіх дисциплін, з яких передбачено екзамени на денній формі навчання через центр тестування університету [13].

Різні форми та методи проведення занять, вдосконалення системи їх контролю значно підвищили ефективність навчального процесу, посилили у студентів інтерес до навчання, розширили їх світогляд.

Важливим напрямком підготовки фахівців для нафтогазового комплексу України було працевлаштування молодих спеціалістів. До 2010 року було укладено угоди на підготовку спеціалістів із провідними галузевими підприємствами, організаціями, установами такими як ДК «Укргазвидобування», ВАТ «Укрнафта», ДК «Укртрансгаз».

За денною формою навчання було підготовлено 7396 фахівців за 27 спеціальностями, з них 4406 осіб навчались за держзамовленням і 2990 осіб за кошти юридичних та фізичних осіб. Направлення на роботу отримали 4706 випускників. На підприємства нафтогазової галузі направлено 2399 (51 %) спеціалістів, виходячи з того, що вони були основними замовниками фахівців, яких готує університет [14].

Аналіз даних свідчить про те, що попри відсутність централізованого держзамовлення у 2003–2005 рр. підприємства нафтогазової галузі замовляли молодих фахівців на достатньому рівні, а саме 75,5–79,4 % випускників основних нафтогазових спеціальностей працевлаштовувалися на галузевих підприємствах.

Однак, уже у 2006–2010 р., коли економічна криза негативно вплинула на діяльність, зокрема і нафтогазового комплексу, дещо знизився попит на випускників університету. Так, якщо у 2008 р. на підприємство ВАТ «Укрнафта» було направлено 95 осіб, то вже у 2009 р. – всього 42 особи; на геологічні підприємства, відповідно, 51:26 осіб. Всього ці показники становили 226 у 2008 р. і 147 – у 2009 р. [15].

Основною ланкою у системі підготовки висококваліфікованих спеціалістів для нафтогазового комплексу України є науковий потенціал університету. На 2010 рік він уже був достатньо сформованим і фаховим. Застосування контрактної форми трудових відносин сприяло кращому підбору і закріпленню науково-педагогічних кадрів, раціональному і більш ефективному їх використанню. Кількість науково-педагогічних працівників зросла із 641 у 2004 році до 786 у 2009 році. На 8-и кафедрах чисельність викладачів із науковими ступенями перевищила 80 %. У 2009 р. на 57 кафедрах професорсько-викладацький склад нараховував 78 докторів наук,

професорів і 363 кандидатів наук, доцентів. Частка випускних кафедр, які очолюють доктори наук, професори становила понад 75 відсотків [16].

Протягом 2005–2009 рр. 14 науково-педагогічних працівників університету стали лауреатами Державної премії України в галузі науки і техніки. В університеті вперше було присвоєне звання члена-кореспондента АН України, ним став ректор університету Крижанівський Є. І. (на сьогоднішній день – уже академік АН України).

В університеті функціонували 6 спеціалізованих вчених рад із захисту кандидатських за 9 спеціальностями і докторських дисертацій за 6 спеціальностями. Всього за 2003–2009 рр. працівниками університету було захищено 24 докторські і 150 кандидатських дисертацій [17].

Велика увага приділялася ректором у ті роки зміцненню матеріально-технічної бази університету. Так щорічно покращувалась комп'ютеризація навчального процесу. На 2009 р. в ІФНТУНГ функціонувало 28 окремих комп'ютерних класів, всього у навчальному процесі використовувались 1186 комп'ютерів, що майже вдвічі більше, ніж у 2003 році [18]. Значно розширено використання комп'ютерних технологій, зокрема, розпочато введення в університеті дистанційної форми навчання. При бібліотеці активно почав створюватися електронний каталог друкованих науково-технічних видань. Більшість лабораторних робіт проводиться на діючих установках та макетах, у навчально-виробничих майстернях. За рахунок введення у навчальний процес і оснащення нових приміщень значно збільшилась кількість спеціалізованих кабінетів та навчальних лабораторій. Якщо у 2003 р. їх кількість складала 187, то у 2009 – 271 [19].

Володіючи вагомим кадровим потенціалом, матеріально-технічною базою навчання, ІФНТУНГ активно проводить перепідготовку та підвищення кваліфікації керівних кадрів і спеціалістів нафтогазової галузі. Із цією метою у 2001 р. на базі існуючого на той час факультету післядипломної освіти утворено Інститут післядипломної освіти (ІПО). До складу ІПО входять навчальний та методичний сектори, лабораторія комп'ютерної підготовки видань, а із 2004 року – тренажерний буровий центр.

За рахунок активної інформаційно-роз'яснювальної роботи, а також високого рівня репутації університету серед підприємств нафтогазового комплексу та інших секторів національної економіки спостерігалась стабільна тенденція до зростання обсягів перепідготовки впродовж 2003–2009 рр. Так якщо у 1996–2002 роках здобули другу вищу освіту 1286 слухачів, то у 2003–2009 роках – відповідно 1937 [20].

В університеті проводилась робота щодо підвищення кваліфікації керівних кадрів і спеціалістів для різних галузей економіки і, в першу чергу, для нафтогазового комплексу України. Так, за цей період пройшли підвищення кваліфікації 3119 осіб, у тому числі 2742 особи (87,9 % – працівники нафтогазової галузі України [21].

Аналіз фактичних обсягів підвищення кваліфікації спеціалістів та керівних працівників у розрізі окремих підприємств нафтогазового комплексу України свідчить, що основними замовниками даних освітніх послуг є Національна акціонерна компанія «Нафтогаз України» та її окремі структурні підрозділи. Так, за період із 2003 по 2009 роки найбільші обсяги підвищення кваліфікації було здійснено за замовленнями таких суб'єктів господарювання, як ДК «Укртрансгаз» – 1585 осіб (або 57,8 % від загальних обсягів підвищення кваліфікації для підприємств нафтогазового комплексу України), ДК «Укргазвидобування» – 655 осіб (23,9 %), ВАТ «Укрнафта» - 269 осіб – (9,8 %), НАК»Нафтогаз України» (апарат управління) – 73 особи (2,7 %) [22]. Високий рівень диференціації освітніх програм дозволяє задовільнити індивідуальні фахові запити практично кожного слухача. Діяльність Інституту післядипломної освіти знайшла визнання не тільки на теренах нашої держави, але і у зарубіжжі. До нас на навчання приїжджають слухачі з країн Балтії, Білорусії, Росії, В'єтнаму, Сірійської Арабської Республіки.

Принципово новим інноваційним напрямком діяльності ІПО є формування системи міжнародної сертифікації фахівців – буровиків. Із цією метою, влітку 2004 року в структурі інституту був створений буровий тренажерний центр для сертифікації спеціалістів бурових підприємств України. Центр отримав акредитацію Міжнародного форуму контролю свердловин. Згідно із умовами акредитації центр надає для спеціалістів бурових підприємств освітянські послуги за міжнародними стандартами, які відповідають вимогам ISO. Із грудня 2004 року до 2010 року в тренажерному буровому центрі пройшли навчання та отримали міжнародний сертифікат 323 фахівців нафтогазової галузі України та інших країн, у тому числі 102 спеціалісти ДК «Укргазвидобування», 67 – ВАТ «Укрнафта» та більше 70 фахівців із комерційних бурових компаній [23].

Отримавши звання національного, розгорнувши активну діяльність на всіх напрямках удосконалення системи підготовки фахівців для нафтогазового комплексу України ІФНТУНГ реально поставив перед собою за мету досягнути максимальних результатів у цій діяльності. 29 червня 2011 року на конференції трудового колективу було затверджено Програму розвитку Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу на період 2011–2020 років.

На сьогоднішній день триває напружена праця в університеті, її результати вказують на те, що високі завдання будуть успішно виконані. Вагоме місце у системі підготовки фахівців для нафтогазового комплексу України займає Дрогобицький нафтогазовий технікум – навчальний заклад освіти першого рівня акредитації. Створений згідно наказу Народного Комісара нафтової промисловості № 58 від 20.01.1945 року для підготовки фахівців зі

спеціальностей «Буріння нафтових і газових свердловин», «Технологія нафти і газу», «Обладнання нафтопереробних промислів», «Промислове та цивільне будівництво» [25, с. 212].

Перший випуск спеціалістів відбувся у 1948 році. Враховуючи збільшення потреб у фахівцях для нафтових підприємств Прикарпаття, у 1953 р. було відкрито вечірнє відділення з філіалом у м. Бориславі, у якому велася підготовка спеціалістів без відриву від виробництва зі спеціальностей «Експлуатація нафтових і газових свердловин» та «Технологія нафти і газу». У 1957 р. до Дрогобицького нафтогазового технікуму був приєднаний Львівський нафтогазовий технікум.

У 1958 р. було відкрито заочне відділення, а у 1959 р. – Долинський філіал вечірнього відділення. Ці підрозділи у зв'язку зі зменшенням кількості вступників були закриті – у 1973 році Бориславська філія, а у 1875 р. – Долинська [26, с. 2].

У 1997 р. Дрогобицький нафтогазовий технікум отримав ліцензію на право підготовки фахівців на рівні кваліфікаційних вимог до молодшого спеціаліста із спеціальностей «Економіка підприємства», та «Експлуатація газонафтопроводів і газонафтосховищ».

Наказом Міністерства освіти і науки молоді та спорту України № 870 від 02.08.2012 р. Дрогобицький нафтогазовий технікум перейменовано у Державний вищий навчальний заклад «Дрогобицький коледж нафти і газу».

Увесь навчально-виховний процес у коледжі здійснюється викладачами чотирнадцяти циклових комісій, вісім з яких – випускні, а шість – з гуманітарних, соціально-економічних та професійно-орієнтованих дисциплін. За всі роки своєї плідної праці на ниві підготовки спеціалістів для нафтогазового комплексу України Дрогобицький коледж нафти і газу випустив майже 18 тисяч кваліфікованих фахівців [27, с. 3].

Висновки

На сьогоднішній день процеси підготовки кадрів управлінців для нафтогазової галузі економіки України розвиваються динамічно, відповідають вимогам сучасності та повністю задовольняють зростаючі потреби часу.

Список використаної літератури

1. Архів Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ), опис 1, од. зб. 8, ст. 83.
2. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 8, ст. 16.
3. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 8, ст. 23.
4. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 8, ст. 32.
5. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 8, ст. 40.
6. Архів ІФНТУНГ у, опис 1, од. зб. 8, ст. 52.
7. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 9, ст. 12.
8. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 9, ст. 16.
9. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 9, ст. 20.
10. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 9, ст. 23.
11. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 9, ст. 26–31.
12. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 9, ст. 44.
13. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 9, ст. 49.
14. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 9, ст. 55.
15. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 9, ст. 70.
16. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 9, ст. 76.
17. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 10, ст. 13.
18. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 10, ст. 16.
19. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 10, ст. 24.
20. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 10, ст. 27–30.
21. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 10, ст. 57.
22. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 10, ст. 64–66.
23. Архів ІФНТУНГ, опис 1, од. зб. 10, ст. 69.
24. Програма розвитку Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу на 2011–2020 роки. Івано-Франківськ, 2011, 20 с.
25. Нариси з історії Дрогобича. Дрогобич, 2009, 252с.
26. Павленко В., Бойко М., Корольова О. Історія Дрогобицького коледжу нафти і газу. – Дрогобич, 2014, 112 с.
27. Дрогобицький нафтовий технікум. – Дрогобич, 2015, 14 с.

References

1. Arkhiv Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu (IFNTUNH), opys 1, od. zb. 8, st. 83.

2. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 8, st. 16.
3. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 8, st. 23.
4. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 8, st. 32.
5. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 8, st. 40.
6. Arkhiv IFNTUNH u, opys 1, od. zb. 8, st. 52.
7. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 9, st. 12.
8. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 9, st. 16.
9. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 9, st. 20.
10. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 9, st. 23.
11. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 9, st. 26–31.
12. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 9, st. 44.
13. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 9, st. 49.
14. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 9, st. 55.
15. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 9, st. 70.
16. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 9, st. 76.
17. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 10, st. 13.
18. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 10, st. 16.
19. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 10, st. 24.
20. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 10, st. 27–30.
21. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 10, st. 57.
22. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 10, st. 64–66.
23. Arkhiv IFNTUNH, opys 1, od. zb. 10, st. 69.
24. Prohrama rozvytku Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho univer-sytetu nafty i hazu na 2011–2020 roky. Ivano-Frankivsk, 2011, 20 s.
25. Narysy z istorii Drohobycha. Drohobych, 2009, 252s.
26. Pavlenko V., Boiko M., Korolova O. Istoriia Drohobytskoho koledzhu naf-ty i hazu. – Drohobych, 2014, 112 s.
27. Drohobytskyi naftovyi tekhnikum. – Drohobych, 2015, 14 s.

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 24.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 35.072.2 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.49

К. М. НАУМЧУК
доктор філософії,
доцент кафедри національної безпеки, публічного управління
та адміністрування
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID: 0000-0002-4195-5124

Т. М. ТРОСТЕНЮК
доктор філософії, доцент,
доцент кафедри національної безпеки, публічного управління
та адміністрування
Державний університет «Житомирська політехніка»
ORCID: 0000-0001-7130-7454

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ДЕРЖАВНОГО УПРАВЛІННЯ ЯК ВАЖЛИВОЇ ДЕМОКРАТИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ В СУЧАСНИХ УМОВАХ

У сучасному демократичному суспільстві, де ключову роль відведено голосу народу, забезпечення високої якості управлінських послуг та гідного рівня життя громадян можливе лише за умови раціональної, обґрунтованої та ефективної організації діяльності органів державної влади. Особливого значення при цьому набуває дотримання принципів законності, прозорості, підзвітності та гуманізму, які становлять основу демократичного врядування. Ефективність державного управління безпосередньо впливає на соціальну стабільність, рівень довіри громадян до влади та здатність держави реагувати на внутрішні й зовнішні виклики, що є надзвичайно актуальним в умовах воєнного стану та трансформаційних процесів в Україні.

Важливо відзначити, що державні інституції в сучасних умовах мають не лише виконувати адміністративні функції, а й виступати інструментом підтримки соціальної згуртованості, формування стратегічного бачення розвитку країни та забезпечення демократичних цінностей навіть у кризових ситуаціях. Для оцінки відповідності діяльності органів влади суспільним очікуванням, пріоритетам і потребам необхідно впроваджувати сучасні, достовірні та комплексні інструменти моніторингу та оцінки ефективності державного управління, які гарантують здатність державних органів до цілеспрямованих і результативних дій, спрямованих на зміцнення державності, розвиток економіки та підвищення добробуту громадян.

У цьому контексті одним із пріоритетних завдань держави у процесі стабілізації та розвитку країни стає забезпечення високого рівня ефективності діяльності органів державної влади як важливої демократичної складової сучасного управління. Особливу актуальність набуває ґрунтовне дослідження та порівняльний аналіз підходів до оцінки результативності державного управління, розроблених як вітчизняними, так і зарубіжними науковцями. Водночас постає потреба у створенні комплексної методики оцінки ефективності державних інституцій, яка враховує сучасні умови функціонування країни, вплив внутрішніх і зовнішніх викликів та дозволяє об'єктивно визначати рівень відповідності управлінських практик суспільним потребам, стратегічним пріоритетам і демократичним цінностям.

Ключові слова: *держава, демократія, управління, державне управління, ефективне управління, публічне управління, демократичні цінності.*

K. M. NAUMCHUK
Doctor of Philosophy, Associate Professor at the Department of National Security,
Public Management and Administration
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID: 0000-0002-4195-5124

T. M. TROSTENIUK
Doctor of Philosophy, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of National Security,
Public Management and Administration
Zhytomyr Polytechnic State University
ORCID: 0000-0001-7130-7454

© Наумчук К. М., Тростенюк Т. М., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF PUBLIC ADMINISTRATION AS AN IMPORTANT DEMOCRATIC COMPONENT IN MODERN CONDITIONS

In a modern democratic society, where the voice of the people plays a key role, ensuring high quality administrative services and a decent standard of living for citizens is possible only under the condition of rational, well-founded and effective organization of the activities of state authorities. Of particular importance in this regard is adherence to the principles of legality, transparency, accountability and humanism, which form the basis of democratic governance. The effectiveness of public administration directly affects social stability, the level of citizens' trust in government and the state's ability to respond to internal and external challenges, which is extremely relevant in the conditions of martial law and transformation processes in Ukraine. It is important to note that state institutions in modern conditions should not only perform administrative functions, but also act as an instrument for supporting social cohesion, forming a strategic vision for the country's development and ensuring democratic values even in crisis situations. To assess the compliance of government activities with public expectations, priorities and needs, it is necessary to implement modern, reliable and comprehensive tools for monitoring and assessing the effectiveness of public administration, which guarantee the ability of state bodies to take targeted and effective actions aimed at strengthening statehood, developing the economy and improving the well-being of citizens.

In this context, one of the priority tasks of the state in the process of stabilizing and developing the country is ensuring a high level of efficiency of state authorities as an important democratic component of modern governance. A thorough study and comparative analysis of approaches to assessing the effectiveness of public administration, developed by both domestic and foreign scientists, is of particular relevance. At the same time, there is a need to create a comprehensive methodology for assessing the effectiveness of state institutions, which takes into account the current conditions of the country's functioning, the impact of internal and external challenges and allows objectively determining the level of compliance of management practices with public needs, strategic priorities and democratic values.

Key words: *state, democracy, governance, public administration, effective governance, public administration, democratic values.*

Постановка проблеми

У сучасних умовах державне управління перестає бути суто адміністративним механізмом надання послуг та ухвалення владних рішень. Натомість воно постає як складний динамічний процес, що має забезпечувати не лише функціонування органів влади, а й активне прогнозування політичних і соціальних змін, ефективну взаємодію з громадянським суспільством, формування прозорості та довіри. Особливого значення набуває інтеграція демократичних принципів у практику державного управління, що вимагає пошуку нових моделей і підходів. Проблема полягає в тому, що традиційні управлінські механізми часто залишаються орієнтованими на односторонній вплив влади на суспільство, тоді як сучасні виклики, зокрема кризові та воєнні, потребують гнучких, етично обґрунтованих та демократично орієнтованих рішень, здатних забезпечити захист національних інтересів і водночас підтримати розвиток демократичних цінностей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Враховуючи значну актуальність теми варто зазначити, що проблемами визначення та оцінювання показників ефективності державного управління займалися численні зарубіжні науковці, серед яких А. Салліван [10], П. Друкер [11], А. Файоль [7] та інші. Вітчизняні дослідники також приділяли увагу теоретико-методологічним аспектам оцінки результативності діяльності державних інституцій: серед них – Ю. Чучук [9], А. Демченко [3], В. Сороко [8], Б. Гаврилишин [2].

Водночас, незважаючи на значний науковий доробок, в Україні досі не сформовано чітко визначених критеріїв оцінки ефективності органів влади, а також відсутній єдиний загальновизнаний підхід до системного оцінювання їх діяльності. Це зумовлює потребу в подальших дослідженнях, спрямованих на розробку комплексних методик і практичних інструментів, які б дозволяли об'єктивно визначати рівень ефективності державного управління в сучасних умовах.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є необхідність дослідити теоретико-методичні підходи до оцінки ефективності державного управління та визначити її роль як ключової демократичної складової у забезпеченні прозорості, підзвітності та результативності діяльності органів влади в сучасних умовах.

Викладення основного матеріалу дослідження

Дослідження теоретико-методичних засад оцінки ефективності державного управління, а також формування завершених концептуальних підходів і практично обґрунтованих методик у цій сфері стикається з низкою складнощів. Це пов'язано зі складністю та багатогранністю категорії «ефективність» щодо діяльності державних інституцій, що зумовлює різноманітність і неоднозначність наукових підходів до проблеми. Сприйняття ефективності державного управління може відрізнятися в залежності від індивідуальних оцінок громадян та історичного контексту. Водночас особливого значення набуває компетентна оцінка роботи органів влади, здійснена фахівцями та експертами у сфері публічного управління. Системне та кваліфіковане оцінювання ефективності

діяльності державних інституцій виступає ключовим елементом удосконалення державного управління, сприяє підвищенню прозорості та підзвітності органів влади та зміцненню демократичних принципів у суспільстві. Ефективність державного управління, що ґрунтується на прийнятті компетентних і зважених управлінських рішень, має значний потенціал для забезпечення динамічного розвитку суспільної системи. У цьому контексті особливої актуальності набуває дослідження критеріїв оцінювання результативності державного управління на різних рівнях соціальної організації. Серед них зазвичай виокремлюють загальний, локальний, соціальний, економічний, політичний, інтегральний та частковий критерії. Водночас основна увага здебільшого приділяється двом ключовим аспектам ефективності функціонування соціальних утворень – соціальному та економічному. Ефективність виступає одночасно як показник результативності та ключовий стимул розвитку. У прагненні підвищити рівень ефективності конкретної діяльності та її загального функціонування, науковці в різних сферах визначають, розробляють і впроваджують заходи, що сприяють прогресу, одночасно відсікаючи ті, які можуть призвести до регресу.

Від 24 лютого 2022 року Україна перебуває у стані воєнної агресії, що зумовило суттєві трансформації у сфері політичного та державного регулювання. У таких умовах відмінності між державним управлінням у мирний та воєнний час стають особливо відчутними, адже критерії його ефективності мають враховувати не лише соціально-економічні показники, а й фактори безпеки, мобілізаційної готовності та стійкості суспільних інститутів. Державне управління у воєнний період передбачає не лише забезпечення безперервності надання адміністративних послуг та виконання базових функцій органів влади, але й активне формування суспільної згуртованості, підтримку довіри громадян, протидію дезінформації, а також забезпечення прозорої та відповідальної взаємодії з громадськістю. Таким чином, ефективність управління визначається не тільки здатністю приймати оптимальні рішення, а й спроможністю державних інституцій оперативно адаптуватися до кризових викликів, забезпечуючи баланс між безпекою та демократичними цінностями [1].

Державне управління в Україні нині стикається з масштабними викликами, зумовленими збройною агресією російської федерації. На тимчасово окупованих територіях функціонування органів влади істотно ускладнене або повністю паралізоване, що створює вакуум управлінських рішень і знижує рівень забезпечення прав громадян. Крім того, гострою проблемою є брак кваліфікованих кадрів у системі державного управління, спричинений масовою міграцією населення, мобілізаційними процесами, а також значними втратами у сфері освітньої інфраструктури, що унеможливлює своєчасну підготовку нових фахівців. Ці фактори безпосередньо впливають на ефективність управління, адже обмежують кадровий потенціал державних інституцій, знижують спроможність органів влади швидко реагувати на кризові виклики та реалізовувати довгострокові стратегії розвитку. Водночас такі умови вимагають від державного управління посилення інноваційних підходів, гнучкості в ухваленні рішень та активнішої взаємодії з громадянським суспільством, що стає додатковим ресурсом у процесі подолання наслідків війни [5].

Оцінка ефективності діяльності державних органів є важливою складовою процесу удосконалення державного управління та зміцнення демократичних принципів у країні. Водночас ця оцінка має певний суб'єктивний характер, оскільки різні громадяни, інституційні одиниці чи учасники економічних процесів можуть по-різному оцінювати ефективність та раціональність діяльності органів влади. Проте існування індивідуальних думок не заперечує необхідності кваліфікованої та професійної оцінки роботи державних органів, яку повинні здійснювати компетентні експерти та фахівці.

Особливої актуальності ця оцінка набуває в умовах воєнного стану в Україні, коли діяльність державних органів у багатьох регіонах обмежена або ускладнена. Війна впливає на ефективність управління, змінює пріоритети державних рішень, підвищує значення оперативного та адаптивного адміністрування, а також потребує підвищеної прозорості, підзвітності та здатності держави до швидкого реагування на соціальні та економічні виклики. У таких умовах системна оцінка ефективності стає критично важливою для забезпечення стабільності, довіри громадян та підтримки демократичних цінностей.

Оскільки суспільні очікування змінюються під тиском зовнішніх і внутрішніх обставин, це вимагає своєчасного реформування системи державного управління, підвищення її гнучкості та ефективності, а також розвитку управлінських компетенцій кадрів в інтересах забезпечення високого рівня послуг для громадян. При формуванні системи показників ефективності діяльності державних інституцій доцільно виділяти такі індикатори оцінки державного управління як:

1. Дієвість – показник досягнення державним органом поставлених цілей. Вимірюється порівнянням запланованих та фактичних результатів діяльності, як окремих працівників, так і колективів або інституцій у цілому.
2. Економічність – співвідношення передбачених та фактично використаних ресурсів для досягнення цілей і виконання завдань.
3. Якість – ступінь відповідності діяльності органів влади суспільним очікуванням, законодавчим нормам і встановленим стандартам.

4. Впровадження інновацій – показник реального застосування нових методів, технологій і прогресивних підходів у діяльності державної інституції для підвищення ефективності та прозорості управлінських процесів.

5. Продуктивність – обсяг виконаних управлінських функцій, наданих адміністративних послуг чи виробленої в процесі роботи інформації.

6. Адаптивність – здатність державного органу ефективно виконувати покладені функції за умов зміни зовнішніх та внутрішніх обставин; ширший діапазон змін свідчить про більшу гнучкість інституції.

7. Гнучкість – можливість органів влади змінювати свою роль у процесі прийняття рішень, налагоджувати нові зв'язки та коригувати процедури управління без порушення організаційної структури.

8. Оперативність – своєчасність виявлення проблем та швидкість їх вирішення, що забезпечує ефективність досягнення цілей та стійкість управлінських процесів.

9. Надійність – здатність органу безперебійно виконувати завдання у межах встановлених термінів і ресурсів, з дотриманням нормативів і планових показників.

10. Доброчесність – орієнтація діяльності державного органу на захист публічних інтересів і відсутність домінування приватних інтересів у процесі виконання повноважень, що є фундаментальною умовою зміцнення демократичних принципів управління.

Оцінка ефективності діяльності державних органів є ключовою для удосконалення державного управління та зміцнення демократичних принципів. Водночас складність такої оцінки полягає в тому, що державні інституції не виробляють матеріальні блага, тому неможливо обчислити фізичний обсяг продукту, його споживчу або мінову вартість, визначити ціну та співставити попит і пропозицію. Уві ці аспекти мають діяти комплексно та з урахуванням думки громадськості. На жаль, в Україні даний процес перебуває на стадії постійної трансформації та адаптації до сучасний реалій, та також євроінтеграційного курсу. Однією з основних функцій державного управління є регулювання управлінської діяльності, що допомагає забезпечувати захист прав та свобод людини. Однак Україна має ряд проблем з виконанням даних функцій, зокрема проблема корупції, наявність суперечок середині державного апарату, відсутність належного регулювання та наявність колізій та прогалин у законодавстві, низькій рівень прозорості державного управління, відсутність громадського контролю [4].

На основі цього варто зазначити, що ефективність державного управління має багато недосконалостей, тому про хорошу ефективність державного регулювання в умовах сьогодення мова йти не може. Хоча держава запроваджує ряд заходів для її підвищення:

1. Діджиталізація – це допомагає знизити корупційні прояви, тепер легко та без черг можна отримати необхідні довідки, замінити документи, також можна слідкувати за державними закупівлями.

2. Проведення антикорупційних реформ – створення державних органів для боротьби з корупцією, декларування державних службовців.

3. Збільшення оборонного потенціалі держави

4. Євроінтеграційний курс – допомагає усталити демократичні аспекти, а також укладення додаткових гуманітарних угод

5. Зміна підходів до соціально-економічної складової держави [3].

Сучасна концепція функціонування державних інституцій, орієнтована на ефективне публічне управління, має передбачати підвищення якості державних послуг при одночасному зниженні їхньої питомої вартості, забезпечення прозорості та підзвітності діяльності органів влади, а також оперативне реагування на змінні та нові потреби користувачів публічних послуг. На сьогодні ефективність державного управління перебуває на проміжному етапі, адже у кожній із сфер суспільного життя наявні прогалини, які де дають можливості для ефективності державного регулювання.

Висновки

Отже, дослідивши сутність і природу ефективності діяльності державних інституцій, можна констатувати, що ефективність є багатогранним і складним явищем, яке можливо оцінити лише за допомогою комплексної системи спеціально розроблених показників. Саме така оцінка дозволяє не лише підвищувати результативність управлінських процесів, а й зміцнювати демократичні принципи прозорості, підзвітності та публічного контролю у функціонуванні державних органів. Слід зазначити, що навіть в умовах війни державне управління в Україні продемонструвало здатність адаптуватися до нових реалій і продовжувати виконувати ключові функції, забезпечуючи життєдіяльність суспільства. Водночас існують суттєві проблеми, серед яких – неповне виконання управлінських завдань у районах, де тривають бойові дії або території перебувають під окупацією, кадровий дефіцит через міграцію та руйнування освітньої інфраструктури, а також обмеженість ресурсів. Ці чинники негативно впливають на якість державних послуг і знижують загальну ефективність управлінських процесів.

Разом з тим, держава демонструє прагнення подолати ці виклики шляхом реалізації реформ і модернізаційних підходів. Тому подальший розвиток системи державного управління потребує послідовного втілення таких кроків: продовження реформи децентралізації та зміцнення місцевого самоврядування; активізації боротьби з корупцією;

підвищення професійного рівня та етичної культури державних службовців; впровадження та розширення електронного урядування; забезпечення надійного соціального захисту населення; розширення взаємодії з громадянським суспільством і залучення громадян до процесу ухвалення управлінських рішень. Таким чином, ефективне функціонування державного управління в умовах війни та післявоєнного відновлення залежатиме від здатності держави не лише вирішувати поточні проблеми, а й формувати нову якість управлінських практик, орієнтованих на демократичні цінності, стійкість та розвиток суспільства.

Список використаної літератури

1. Борщевський В., Василиця О., Матвєєв Є. Публічне управління в умовах воєнного стану: інституційні трансформації, стратегічне планування та механізми розвитку. Держава та регіони. 2022. № 2(76). С. 30–35. URL: http://pa.stateandregions.zp.ua/archive/2_2022/5.pdf

2. Гаврилишин Б. До ефективних суспільств: Дороговкази в майбутнє : доп. Римському Клубові. К. : Пульсари, 2009. 248 с.

3. Демченко А. О., Момот О. І. Про сутність понять «ефективність» та «результативність» в економіці. Економічний вісник Донбасу. 2013. № 3. С. 207–210. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecvd_2013_3_29

4. Назарян А. Шляхи підвищення ефективності функціонування державного управління в умовах війни. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. 2024. Вип. 1(19). С. 132–136. URL: https://gov.bulletin.knu.ua/article/view/3024/2550

5. Неліпа Д. Критерії ефективності державного управління: ракурс європейського союзу. Наукові інновації та передові технології. 2024. № 2(30). С. 223–234.

6. Пономаренко О. С., Морозюк Ю. В., Нинюк М. А. Вплив воєнних дій на ефективність державного управління в Україні. Академічні візії. 2024. Вип. 32. URL https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/1198/1069

7. Принципи управління Анрі Файоля. URL: https://pidru4niki.com/20080215/menedzhment/ printsipi_upravlinnya_anri_fayolya

8. Сороко В. М. Результативність та ефективність державного управління і місцевого самоврядування : навч. посіб. К. : НАДУ, 2012. 260 с.

9. Чучук Ю.В. Теоретична сутність понять економічна ефективність та ефективність діяльності. Ефективна економіка. 2014. № 2. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=2765.

10. Sullivan A., Steven M. Sheffrin Economics: Principles in action. Upper Saddle River. New Jersey : Pearson Prentice Hall, 2003. 320 с.

11. Drucker P. Management: Tasks, Responsibilities, Practices. New York : HarperCollins, 1974. P. 84.

References

1. Borshchevskyi, V., Vasylytsia, O. & Matvieiev, Ye. (2022). Publichne upravlinnia v umovakh voiennoho stanu: instytutsiini transformatsii, stratehichne planuvannia ta mekhanizmy rozvytku [Public administration under martial law: institutional transformations, strategic planning and development mechanisms]. *Derzhava ta rehiony*, No 2(76), pp. 30–35, http://pa.stateandregions.zp.ua/archive/2_2022/5.pdf [in Ukrainian].

2. Havrylyshyn, B. (2009). Do efektyvnykh suspilstv: Dorohovkazy v maibutnie : dop. Rymskomu Klubovi [Toward effective societies: Road signs to the future: supplement to the Club of Rome]. Kyiv : Pulsary, 248 p. [in Ukrainian].

3. Demchenko, A. O. and Momot, O. I. (2013). Pro sutnist poniat “efektyvnist” ta “rezultatyvnist” v ekonomitsi [On the essence of the concepts of “efficiency” and “effectiveness” in economics]. *Ekonomichnyi visnyk Donbasu*, No 3, pp. 207–210, http://nbuv.gov.ua/UJRN/ecvd_2013_3_29 [in Ukrainian].

4. Nazarian, A. (2024). Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti funktsionuvannia derzhavnoho upravlinnia v umovakh viiny [Ways to increase the efficiency of public administration in wartime]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka*, No 1(19), pp. 132–136, https://gov.bulletin.knu.ua/article/view/3024/2550 [in Ukrainian].

5. Nelipa, D. (2024). Kryterii efektyvnosti derzhavnoho upravlinnia: rakurs yevropeiskoho soiuzu [Criteria for the efficiency of public administration: the perspective of the European Union]. *Naukovi innovatsii ta peredovi tekhnolohii*, No 2(30), pp. 223–234 [in Ukrainian].

6. Ponomarenko, O. S., Moroziuk, Yu. V. & Nyniuk, M. A. (2024). Vplyv voiennykh dii na efektyvnist derzhavnoho upravlinnia v Ukraini [The impact of military operations on the effectiveness of public administration in Ukraine]. *Akademichni vizii*, No. 32, https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/1198/1069 [in Ukrainian].

7. Pryntsypy upravlinnia Anri Faiolia [Henri Fayol’s management principles], https://pidru4niki.com/20080215/menedzhment/ printsipi_upravlinnya_anri_fayolya [in Ukrainian].

8. Soroko, V. M. (2012). Rezultatyvnist ta efektyvnist derzhavnoho upravlinnia i mistsevoho samovriaduvannia [Effectiveness and efficiency of public administration and local self-government: teaching manual]. Kyiv : NADU, 260 p. [in Ukrainian].

9. Chuchuk, Yu. V. (2014). Teoretychna sutnist poniat ekonomichna efektyvnist ta efektyvnist diialnosti [Theoretical essence of the concepts of economic efficiency and efficiency of activity]. *Efektyvna ekonomika*, No 2, http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=2765. [in Ukrainian].

10. Sullivan, A. & Steven, M. (2003). Sheffrin Economics: Principles in action. Upper Saddle River. New Jersey : Pearson Prentice Hall, 320 p. [in English].

11. Drucker, P. (1974). Management: Tasks, Responsibilities, Practices. New York : HarperCollins. P. 84 [in English].

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 23.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 351 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.50

О. В. ПОЛОВЦЕВ
доктор наук з державного управління, професор,
професор кафедри державного управління і місцевого самоврядування
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-4736-6133

О. П. ЗУБАЛЬ
здобувач бакалаврського рівня освіти за спеціальністю
281 «Публічне управління та адміністрування»
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0004-5746-7522

ЦІЛІСНА ПРОФОРІЄНТАЦІЙНА СИСТЕМА ЯК ОДИН З ОСНОВНИХ АСПЕКТІВ ЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ЛЮДСЬКИМИ РЕСУРСАМИ

Робота присвячена аналізу європейського досвіду профорієнтаційної діяльності публічної влади та формулюванню пропозицій щодо шляхів вдосконалення української системи профорієнтації. Проведено комплексний аналіз досвіду 36 країн Європи в галузі профорієнтаційної політики. Особлива увага приділяється законодавчим основам, стратегічним підходам та наявним практикам, найактуальніші з яких впроваджуються в таких країнах, як Італія, Фінляндія, Австрія, Бельгія, Данія та інші. Прикладами продемонстровано, що ефективна система профорієнтації є невід'ємним елементом ефективного управління людськими ресурсами та регулювання ринку праці, забезпечуючи відповідність результатів освіти громадян реальним економічним потребам в державі.

У дослідженні було наголошено на значних недоліках профорієнтаційної системи України серед яких: відсутність системності проведення профорієнтаційних заходів у навчальних закладах, повна відсутність залучення вчителів до вибору школярами майбутніх спеціальностей, відсутність фахівців з профорієнтації, відсутність єдиної стратегії координації суб'єктів профорієнтаційної системи, нестабільне фінансування програм з профорієнтації, обмежений доступ до якісних послуг консультування у віддалених регіонах, недостатня інтеграція профорієнтації у формальну освіту.

Спираючись на європейську практику та недоліки української системи профорієнтації, було запропоновано створення портфоліо кожної дитини та облік відомостей, які вказують на зацікавленість певним напрямком, схильностей до певних дисциплін, що буде виконувати роль не лише як готового офіційного резюме для майбутніх абітурієнтів та працівників, але і як база даних задля залучення потенційних вступників та фахівців. Також авторами разом з описом цифрового інструменту було розроблено його візуалізацію задля кращого сприйняття наведеної пропозиції.

Ключові слова: *публічна влада, публічне управління, суспільний розвиток, профорієнтаційна система, управління людськими ресурсами, криза нестачі кваліфікованих кадрів, освіта, зайнятість.*

O. V. POLOVTSEV
Doctor of Science in Public Administration, Professor,
Professor at the Department of Public Administration and Local Government
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0003-4736-6133

O. P. ZUBAL
Bachelor's Degree Applicant in Specialty 281 "Public Administration"
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0004-5746-7522

COMPREHENSIVE GUIDANCE SYSTEM AS ONE OF THE MAIN ASPECTS OF EFFECTIVE HUMAN RESOURCE MANAGEMENT

The work is devoted to the analysis of the European experience of public authorities' guidance activities and the formulation of proposals on ways to improve the Ukrainian guidance system. A comprehensive analysis of the experience of 36 European countries in the field of guidance policy has been carried out. Particular attention is paid to the legislative framework, strategic approaches and existing practices, the most relevant of which are implemented in countries such as Italy, Finland, Austria, Belgium, Denmark and others. Examples demonstrate that an effective guidance system is

© Половцев О. В., Зубаль О. П., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

an integral element of effective human resources management and labor market regulation, ensuring that the results of citizens' education correspond to the real economic needs of the state.

The study highlighted significant shortcomings of the Ukrainian guidance system, including: lack of systematic guidance activities in educational institutions, almost complete lack of influence of teachers on students' choice of future specialties, lack of guidance specialists, lack of a unified strategy for coordinating the subjects of the guidance system, unstable funding of programs, limited access to quality counseling services in remote regions, insufficient integration of guidance into formal education.

Based on European practice and shortcomings of the Ukrainian guidance system, it was proposed to create a portfolio for each child and record information indicating interest in a certain direction, inclinations to certain disciplines, which will serve not only as a ready-made official resume for future applicants and employees, but also as a database for attracting potential entrants and specialists. The author also developed a visualization of the digital tool along with a description for a better understanding of the proposal.

Key words: *public authorities, public administration, social development, guidance system, human resources management, qualified personnel shortage crisis, education, employment.*

Постановка проблеми

Вже не перший рік представники української влади звертають увагу на майже повну відсутність як наявних фахівців-інженерів, так і вступників, які б хотіли стати спеціалістами технічного спрямування. Спроби публічної влади зробити дану галузь більш привабливою методами, що першими приходять на думку (державна підтримка спеціальностей, високі заробітні платні тощо), поки не демонструють бажаних результатів [1, 2].

Публічна влада як системна структура в своїй діяльності має враховувати не лише нинішню ситуацію та короткострокові впливи своїх дій, а й прогнозовані майбутні тенденції і довгострокові наслідки сьогоденної роботи. Ще на початку війни (а враховуючи механізми прогнозування, наявні на державному та міжнародному рівнях, можливо і до її настання) логічно було припустити про майбутню затребуваність фахівців технічних напрямів для відбудови зруйнованої інфраструктури, гарантування безпеки через підвищення рівня технологій заради зміцнення позицій на світовій арені тощо. На жаль, не попіклувавшись про створення налагодженого механізму управління людськими ресурсами, які є головною запорукою забезпечення функціонування та розвитку держави, українська влада допустила кризу нестачі кваліфікованих кадрів.

Відсутність стратегічного бачення публічної влади, у формі довгострокових системних програм, щодо забезпечення розвитку країни необхідною за фахом та компетенціями робочою силою обумовлює актуальність пошуку нових продуктів і інструментів в даному напрямку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В подібній ситуації свого часу опинився Сінгапур, відомий своїм стрімким розвитком, але одразу після здобуття своєї незалежності також постраждалий від нестачі фахівців технічних спеціальностей, які були необхідні, аби закріпити власну суб'єктність як держави та запустити індустріалізацію. Влада стикнулась зі стереотипом, який є характерним і для української ситуації, щодо отримання професійної освіти тільки найменш забезпеченими та найменш академічно здібними групами населення, що призводило до відсутності охочих здобувати відповідний фах.

У зв'язку з цим міністерство освіти вжило низку заходів щодо підвищення престижу професійної освіти: по-перше, з розрізнених навчальних закладів (коледжів, училищ) був створений єдиний інститут; по-друге, для популяризації технічних спеціальностей стали застосовуватись маркетингові технології; по-третє, у засобах масової інформації почали активно поширюватись історії успіху випускників інституту. Все це результатом надало значне збільшення чисельності студентів технічних спеціальностей [7].

Досвід Сінгапуру демонструє значний вплив та нашу потребу в організованій та ефективній національній профорієнтаційній системі, що відповідає як інтересам розвитку особистості конкретної молодої людини, так і інтересам суспільства і держави.

Аналіз досліджень та публікацій свідчить про інтерес науковців до вивчення профорієнтаційної системи в умовах сучасного ринку праці та виховання конкурентоздатної особистості [9]. Тим не менш, відсутні в Україні комплексний аналіз досвіду Європи з даного напрямку роботи публічної влади та конкретні пропозиції щодо шляхів вдосконалення української системи профорієнтації зумовлюють написання даної статті.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є аналіз європейського досвіду профорієнтаційної діяльності публічної влади та формулювання пропозицій щодо шляхів вдосконалення української системи профорієнтації.

Викладення основного матеріалу дослідження

Професійна орієнтація – це комплексна науково обґрунтована система форм, методів і засобів, спрямованих на забезпечення допомоги особистості в активному свідомому професійному самовизначенні та трудовому становленні [6].

Цифрова платформа ЮНІСЕФ U-Report у середині 2024 року провела соціологічне опитування під назвою «Потреби молоді у профорієнтації». Результати вказують на відсутність єдиної налагодженої системи, яка б

допомагала молодим людям у професійному самовизначенні та надавала можливість владі послідовно виховувати потрібних спеціалістів. На питання, чи проводились заходи з профорієнтації в їх навчальному закладі, близько 40 % респондентів відповіли, що кілька разів подібні заходи проводились, 25 % дали негативну відповідь, 20 % вказали на регулярність подібних заходів, а 15 % взагалі не знають про наявність таких заходів у своєму навчальному закладі. Ще одним невтішним показником став вплив вчителів на вибір молоддю своєї професії – лише 1,3 % респондентів зазначили про наявність такого, що дуже мало для суб'єктів, що мають здатність планомірно спонукати до вибору професії. 38 % опитуваних вказали на відсутність систематичної профорієнтації у школі як одну з ключових проблем під час вибору професії, ще близько 30 % згадали про таку перешкоду як відсутність профорієнтаційних фахівців, 24 % – про невисокий рівень обізнаності щодо профорієнтаційних послуг [5].

Українська система профорієнтації координується між секторами освіти, приватним сектором та сектором зайнятості, а Міністерство освіти і науки та Державна служба зайнятості відповідають за її державне регулювання. В українській системі особливе місце посідають приватні ініціативи, зокрема платформи для профорієнтації, освітні центри та консалтингові проєкти, що пропонують тести, індивідуальні консультації, кар'єрний коучинг, вступну підготовку до університету. Однак, як зазначено на офіційному сайті Euroguidance (мережа центрів з питань профорієнтації, створена Євросоюзом), незважаючи на різноманітність ініціатив, система профорієнтації в Україні стикається з кількома проблемами: відсутність єдиної стратегії координації, нестабільне фінансування програм, обмежений доступ до якісних послуг консультування у віддалених регіонах та недостатня інтеграція профорієнтації у формальну освіту [8].

З подібними недосконалостями профорієнтаційної системи та глобальними можливостями для самореалізації малоймовірним є системний вплив української влади на молодих громадян, що призводив би до збільшення вступників на тих спеціальностях, у фахівцях з яких держава має потребу.

Враховуючи українську орієнтацію на Євросоюз, доречно розглянути досвід країн Європи, який може бути корисним для загального розуміння тенденцій розвитку профорієнтації в розвинених країнах та слугувати квінтесенцією ідеальної моделі системи профорієнтації. Ці країни вже давно будують бачення майбутнього держави разом з баченням громадянина майбутнього як нерозривних складових свого розвитку.

Інформація по кожній країні спирається на офіційні дані з сайту Euroguidance [10]. На сайті мережі доступна інформація про 36 країн (не враховуючи Україну), системи профорієнтації яких мають багато спільних характеристик, серед них спільна відповідальність двох міністерств в даній сфері політики – міністерства освіти та міністерства праці (конкретні назви відрізняються та залежать від країни). Також в більшості держав робиться акцент на значущості наявності єдиної стратегії безперервної профорієнтації (протягом усього життя, для всіх соціальних груп), рівень та методи контролю за виконанням якої різняться між державами. Австрія подає приклад найбільшої системності в даному аспекті: по-перше, національна стратегія профорієнтації розроблена в рамках та в координації з комплексною національною стратегією розвитку освіти та, по-друге, її реалізація щорічно моніториться на відповідному форумі за участі двох міністерств (освіти та праці). До того ж в рамках австрійської стратегії розроблена загальна концепція профорієнтації у школі, яка адаптується за допомоги призначених державою координаторів в окремі концепції для кожної школи.

Говорячи про інструменти профорієнтації, в кожній країні використовуються приблизно однакові: безпосередні предмети з профорієнтації, включені в навчальні програми (в Естонії формуються базові навички управління кар'єрою ще в дошкільних закладах, діти починають знайомитися з освітою, роботою своїх батьків, а також з концепцією роботи та ринком праці загалом; у Данії викладається «Освіта та робота» в початковій та середній школах; у Франції виділяється час у розкладі старшокласників для отримання консультацій з профорієнтації та вивчення інформації про кар'єрні можливості; у Грузії до програми обов'язкової освіти додано базові професійні курси для учнів старших класів); індивідуальні консультації, що притаманні більшості країн та надаються як у школах, вищих навчальних закладах (зазвичай, ця функція покладена на кар'єрні центри, що надають послуги з профорієнтації всім своїм студентам та випускникам), за які відповідають міністерства освіти, так і в державних службах зайнятості, консультаційних агентствах та центрах, за які відповідають міністерства праці. Щодо надання послуг профорієнтації через державні служби зайнятості Бельгія демонструє один з найбільш структурованих та інклюзивних підходів: перевіряє якість визнаних центрів з профорієнтації, адаптує послуги до особливостей вразливих груп (люди, що мають труднощі з виходом на ринок праці; новоприбулі до країни; малозабезпечена молодь, що ризикує залишити школу заради роботи тощо).

Майже в кожній країні вже надаються безкоштовні послуги з профорієнтації у державних службах зайнятості для всіх вікових та соціальних груп протягом усього життя. Естонія надає можливість отримати виплату допомоги під час пошуку вакансій на ринку праці через Естонський фонд страхування на випадок безробіття. Болгарія та Хорватія подають приклад взаємодії галузей освіти та працевлаштування: педагогічні консультанти у навчальних закладах підтримуються консультантами з питань кар'єри, в тому числі з неурядового сектору; існує практика не лише надання інформації та разових консультацій, а створення індивідуальних планів кар'єрного зростання. Також Хорватія та Фінляндія поставили за мету об'єднати всіх суб'єктів профорієнтаційної роботи в єдину скоординовану систему.

Наразі не так багато країн можуть похвалитись систематизованим законодавчим регулюванням сфери профорієнтації як цілісного напрямку державної політики. Найбільшого прогресу досягла Фінляндія, що створила міцну правову базу для надання послуг з профорієнтації на всіх рівнях освіти, від загальної середньої до вищої, а також для послуг, що надаються службою зайнятості. На національному рівні затверджені рекомендації під назвою «Критерії належного профорієнтування», розроблені з метою забезпечення якості профорієнтації на всіх рівнях шкільної та у професійно-технічній освіті. Система консультування з профорієнтації сертифікована за міжнародними стандартами, а затребувана кваліфікація фахівців даного напрямку визначена законодавством. Також цікавою є наявність, так званих, «центрів єдиного вікна», де для молоді пропонують безкоштовну допомогу з різних питань, пов'язаних з власним життям, таких як навчання, пошук роботи, житла та соціальне забезпечення.

Формування окремих спеціальностей для здобуття фаху у галузі профорієнтації знаходиться на етапі становлення. Декілька магістерських програм з кар'єрної орієнтації та консультування пропонуються в університетах Кіпру, у консультативних центрах Франції допущено до роботи лише психологів та державних службовців, найбільш налагодженою системою підготовки фахівців з кар'єрного консультування розпоряджається на даний момент Данія. Те ж стосується і дослідницького елементу в профорієнтаційних системах держав Європи: здебільшого влада країн звертається до наробок вчених більш ситуаційно, за виникнення конкретного питання, а найбільшою системністю вирізняються Данія з функціонуючими центрами досліджень у сфері профорієнтації та асоціацією науковців і фахівців з даного питання, Австрія з єдиною дослідницькою мережею, в якій містяться всі результати досліджень на тему профорієнтації, а також Франція і Німеччина, що мають державні дослідницькі інститути при своїх відповідальних за профорієнтаційну діяльність структурах влади.

Очікуваним є той факт, що в еру глобальної цифровізації наразі вже кожна країна має електронні інструменти профорієнтації чи для проходження психометричних тестів, чи для надання інформації про освітні та кар'єрні можливості, статистичні дані ринку праці, реєстри зайнятості, чи для онлайн-консультування тощо.

Окремо доцільно виділити Італію з її національним планом відновлення та стійкості, в рамках якого проходить і реформа системи профорієнтації та у 2022 році міністерством освіти було прийнято «Керівні принципи щодо профорієнтації в освіті», метою яких є створення структурованої та скоординованої системи профорієнтації, здатної забезпечити процес безперервного навчання та підготовки фахівців.

У шкільні навчальні плани було введено модулі консультування з профорієнтації (щонайменше 30 годин на рік), розроблені та впроваджені у співпраці зі школами та навчальними установами наступних ступенів освітнього рівня, місцевими та регіональними органами влади, а також службами зайнятості. Також був створений публічний портал робочих місць та кваліфікацій «ATLAS», що надає детальну карту національних кваліфікацій та кар'єр, включає описи основних видів діяльності з безперервної профорієнтації та пов'язані з ними професійні результати. Цікавою інновацією є активація єдиної цифрової платформи консультування для учнів та сімей «UNICA», яка включає електронне портфоліо з повним оглядом шкільного та позакласного освітнього досвіду та отриманих сертифікатів.

Не складно помітити основну тенденцію, що об'єднує державну політику європейських країн у галузі профорієнтації: прагнення розробити єдину систему безперервної профорієнтації, яка пронизує всі ланки освіти та сферу зайнятості, у рамках цілісної стратегії. Все це – підґрунтя для формування громадянина, спроможного будувати майбутнє держави. Саме таку мету доцільно поставити перед собою і українській владі: створити цілісну систему профорієнтації в рамках ефективного управління людськими ресурсами. Наразі робляться кроки у напрямку впровадження більш системної профорієнтаційної діяльності у школах у межах реформи освіти (перехід на 12-річне навчання, де останні три роки є профільними [3]) та запуску Всеукраїнського проєкту з профорієнтації та побудови кар'єри [4], чого все ще може бути недостатньо задля безпосередньо збільшення зацікавленості дітей в обранні тієї спеціальності, фахівців з якої державі не вистачає.

Приклад Сінгапуру демонструє, що стереотипи щодо професійно-технічної освіти як найбільш непрестижної долаються цілісним набором заходів як з боку сфери освіти, так і праці. Але в нинішніх умовах подібна ситуація є ще більш складною для країни у зв'язку зі зростанням цінності окремої індивідуальності та різноманітних можливостей реалізації власного потенціалу завдяки глобалізації і розвитку технологій. Саме тому влада має пройти шлях впровадження більш індивідуального підходу заохочування молоді обирати потрібний фах. Необхідно мати можливість спостерігати за досягненнями, схильностями, захопленнями дітей, здібності яких можуть бути розкриті на «дефіцитних» спеціальностях.

Задля цього, беручи приклад зокрема з Італії, доцільним є складання портфоліо (наприклад, «єПортфоліо») кожної дитини та облік відомостей, які вказують на зацікавленість певним напрямком, схильностей до певних дисциплін, що буде виконувати роль не лише як готового офіційного резюме для майбутніх абітурієнтів та працівників, але і як база даних задля залучення потенційних вступників та фахівців.

Загалом весь інструмент може бути реалізованій на окремій закритій платформі, спільній для Міністерства освіти та науки і Державної служби зайнятості, доступ до якої матимуть вповноважені особи: ті, що подають інформацію на платформу (вихователі, вчителі, викладачі, роботодавці), ті, що роблять запит на інформацію

(представники влади, навчальні заклади, роботодавці) та, зокрема, власники до свого портфоліо (до настання повноліття – їх батьки).

Портфоліо може починатись з загальної інформації: ПІБ, дата народження, місце проживання, РНОКПП (або інший індивідуальний номер ідентифікаційного документу) та актуальної фотографії (підтягується з наявного документу). Наступним може бути розділ дошкільної освіти (за наявності), де обов'язок подавати дані про дитину лежить на вихователі, який закріплений за певною групою та відповідно знає дітей найкраще. Може вказуватись наступна інформація: заклад освіти, дата вступу та випуску, загальна характеристика дитини (самостійна/комунікабельна, активна/посидюча, емоційна/спокійна, творча/аналітична) тощо. Також, беручи приклад з Естонії, в дошкільних закладах можуть бути введені заходи з формування базового розуміння роботи та майбутньої професії, результат яких також може вказуватись в портфоліо як задаток дитини до певної сфери. Інформація надана дошкільним закладом освіти може використовуватись класними керівниками шкіл, до яких вступили діти, задля розуміння особливостей їх характерів та оптимального підходу до взаємодії з ними, підтримки схильностей та захоплень дітей, особливо тих, які здатні стати майбутніми «дефіцитними» фахівцями.



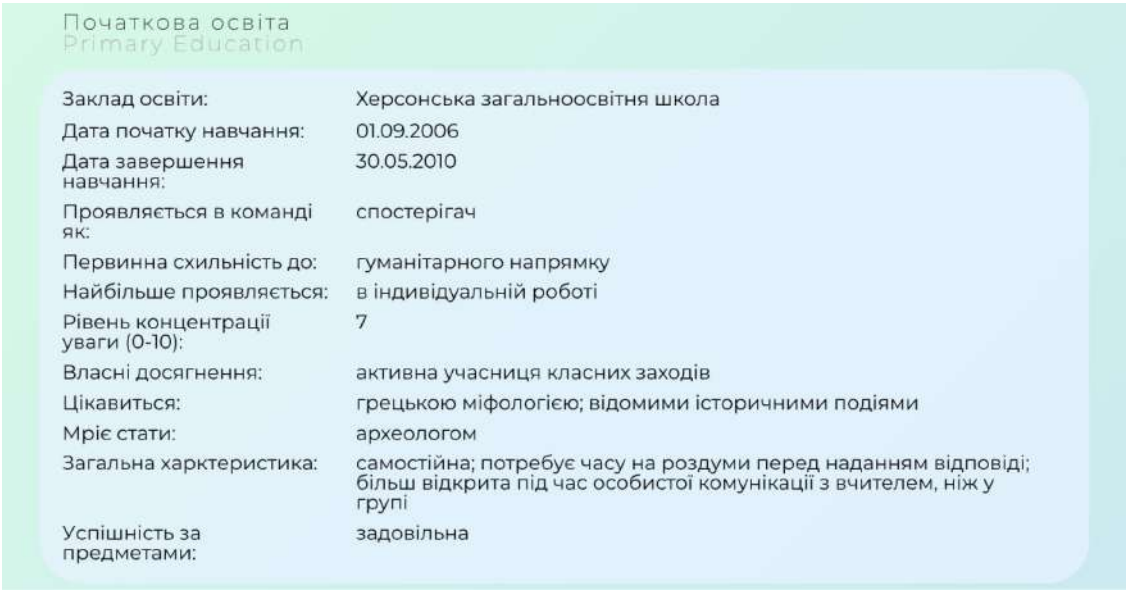
Рис. 1. Ілюстрація розділів загальної інформації та дошкільної освіти у «єПортфоліо»

Джерело: власна розробка авторів

Ще одним необов'язковим розділом у даному резюме може бути ланка позашкільної освіти, якщо дитина відвідуватиме гуртки чи секції. Відповідно в цьому блоці можуть зазначатись навички, які здобула дитина, та рівень їх опанування.

Шкільна освіта поділена на три розділи: початкова (1–4 клас), базова середня (5–9 клас) та повна (або з 2027 – профільна 12-річна) середня (10-11/12 клас). Під час початкової освіти класний керівник спостерігає за тим, та відповідно подає про це інформацію, як дитина проявляється в команді (чи більше проявляється під час індивідуальної роботи), якою є первинна схильність до напрямку (математичний, гуманітарний, природничих наук, творчий, фізичної активності, іноземних мов тощо), рівень концентрації уваги (від 0–10), власні досягнення (конкурси, ініціативи, активність на класних чи позакласних заходах тощо), чим дитина цікавиться (конкретні теми, типи книжок тощо), ким мріє стати (конкретна професія чи напрямок, тип роботи), успішність за предметами (відмінна, задовільна, з найбільшою схильністю до конкретного предмету) та загальну характеристику (інформація, що може бути корисна для налагодження контакту з дитиною майбутньому класному керівникові, вчителям). Вже на етапі початкової освіти навчальні заклади та роботодавці можуть запроваджувати заходи, адаптовані для зацікавленості дітей цього віку, задля їх знайомства з можливостями освіти та роботи в рідному регіоні (чи сусідніх), виховання гордості за працівників, що забезпечують повсякденне життя Батьківщини, розвіювання міфів про «непрестижні» професії та плекання любові до здобуття знань та навичок задля розвитку держави.

У розділі базової середньої освіти доречно вказувати вже явну схильність до конкретного напрямку (фізико-математичний, мовно-літературний, іноземних мов, природничих наук, мистецький тощо), найбільшу успішність та зацікавленість у предметах (за пріоритетами), прояви як інтровертної чи екстравертної людини, рівень концентрації уваги, теми, що цікавлять, наукові та професійні напрямки, які розглядає (за пріоритетами), власні досягнення та загальну характеристику. З такої бази даних по регіону державні чи приватні підприємства, влада,



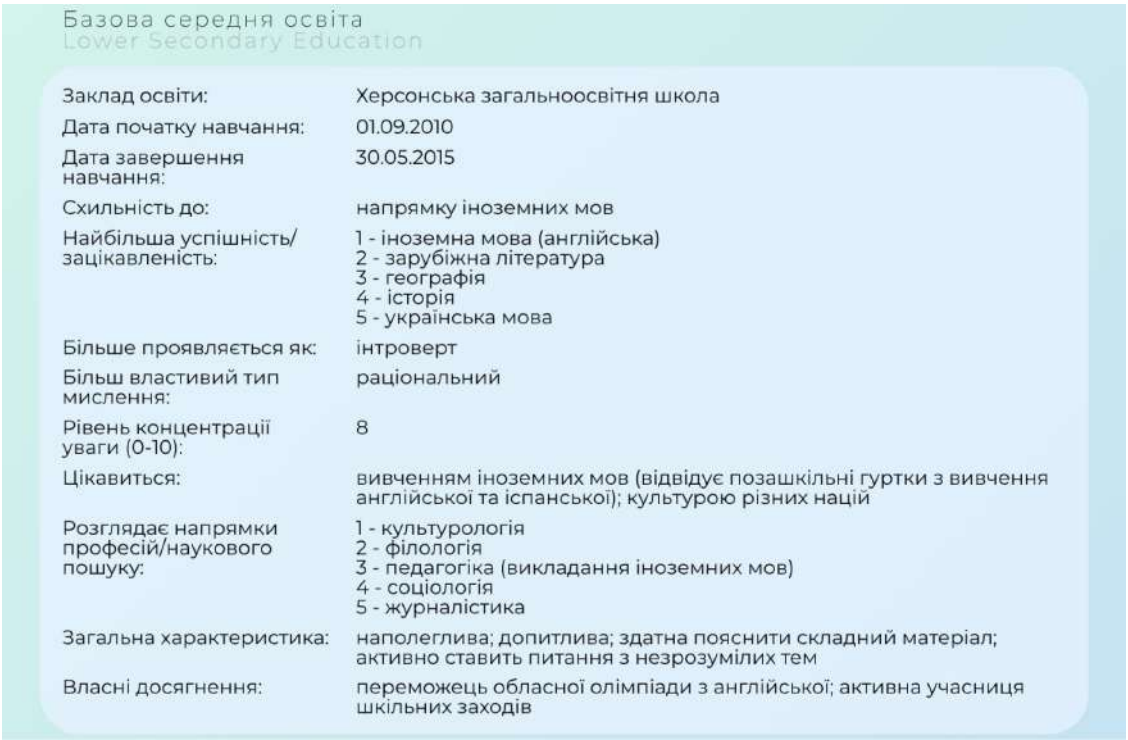
Початкова освіта
Primary Education

Заклад освіти:	Херсонська загальноосвітня школа
Дата початку навчання:	01.09.2006
Дата завершення навчання:	30.05.2010
Проявляється в команді як:	спостерігач
Первинна схильність до:	гуманітарного напрямку
Найбільше проявляється:	в індивідуальній роботі
Рівень концентрації уваги (0-10):	7
Власні досягнення:	активна учасниця класних заходів
Цікавиться:	грецькою міфологією; відомими історичними подіями
Мріє стати:	археологом
Загальна харктеристика:	самостійна; потребує часу на роздуми перед наданням відповіді; більш відкрита під час особистої комунікації з вчителем, ніж у групі
Успішність за предметами:	задовільна

Рис. 2. Ілюстрація розділу початкової освіти у «єПортфоліо»

Джерело: власна розробка авторів

навчальні заклади можуть надалі проводити заохочувальні до майбутнього вступу чи працевлаштування заходи конкретно для дітей з потенціалом, схильностями до необхідної галузі. Кожен з перелічених суб'єктів може таким чином виховувати власних абітурієнтів/працівників та пропонувати їм підтримку (фінансування навчання; гарантія зайнятості тощо).



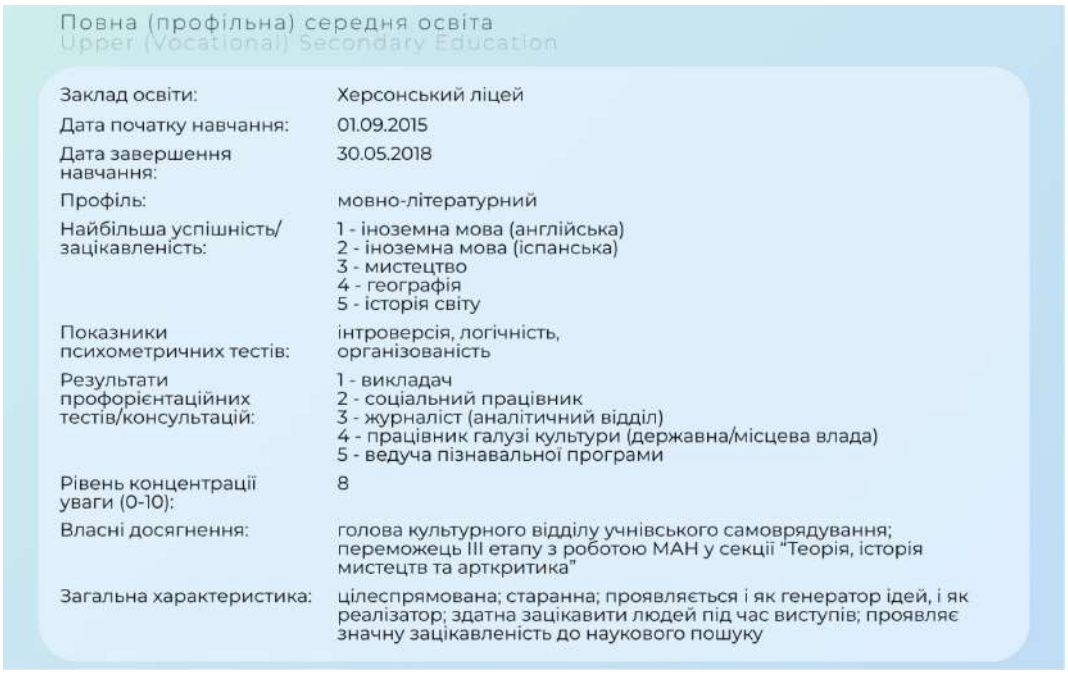
Базова середня освіта
Lower Secondary Education

Заклад освіти:	Херсонська загальноосвітня школа
Дата початку навчання:	01.09.2010
Дата завершення навчання:	30.05.2015
Схильність до:	напрямку іноземних мов
Найбільша успішність/ зацікавленість:	1 - іноземна мова (англійська) 2 - зарубіжна література 3 - географія 4 - історія 5 - українська мова
Більше проявляється як:	інтроверт
Більш властивий тип мислення:	раціональний
Рівень концентрації уваги (0-10):	8
Цікавиться:	вивченням іноземних мов (відвідує позашкільні гуртки з вивчення англійської та іспанської); культурою різних націй
Розглядає напрямки професій/наукового пошуку:	1 - культурологія 2 - філологія 3 - педагогіка (викладання іноземних мов) 4 - соціологія 5 - журналістика
Загальна характеристика:	наполеглива; допитлива; здатна пояснити складний матеріал; активно ставить питання з незрозумілих тем
Власні досягнення:	переможець обласної олімпіади з англійської; активна учасниця шкільних заходів

Рис. 3. Ілюстрація розділу базової середньої освіти у «єПортфоліо»

Джерело: власна розробка авторів

Під час здобуття учнями повної середньої освіти (профільної) класний керівник чи інша відповідальна особа може помічати дані про обраний профіль навчання, дисципліни з найбільшою успішністю та/або зацікавленістю дитини, показники психометричних тестів (інтроверсія/екстраверсія, сенсорика/інтуїція, логіка/емоції, організованість/гнучкість тощо), результати профорієнтаційних заходів, консультацій (рекомендовані професії

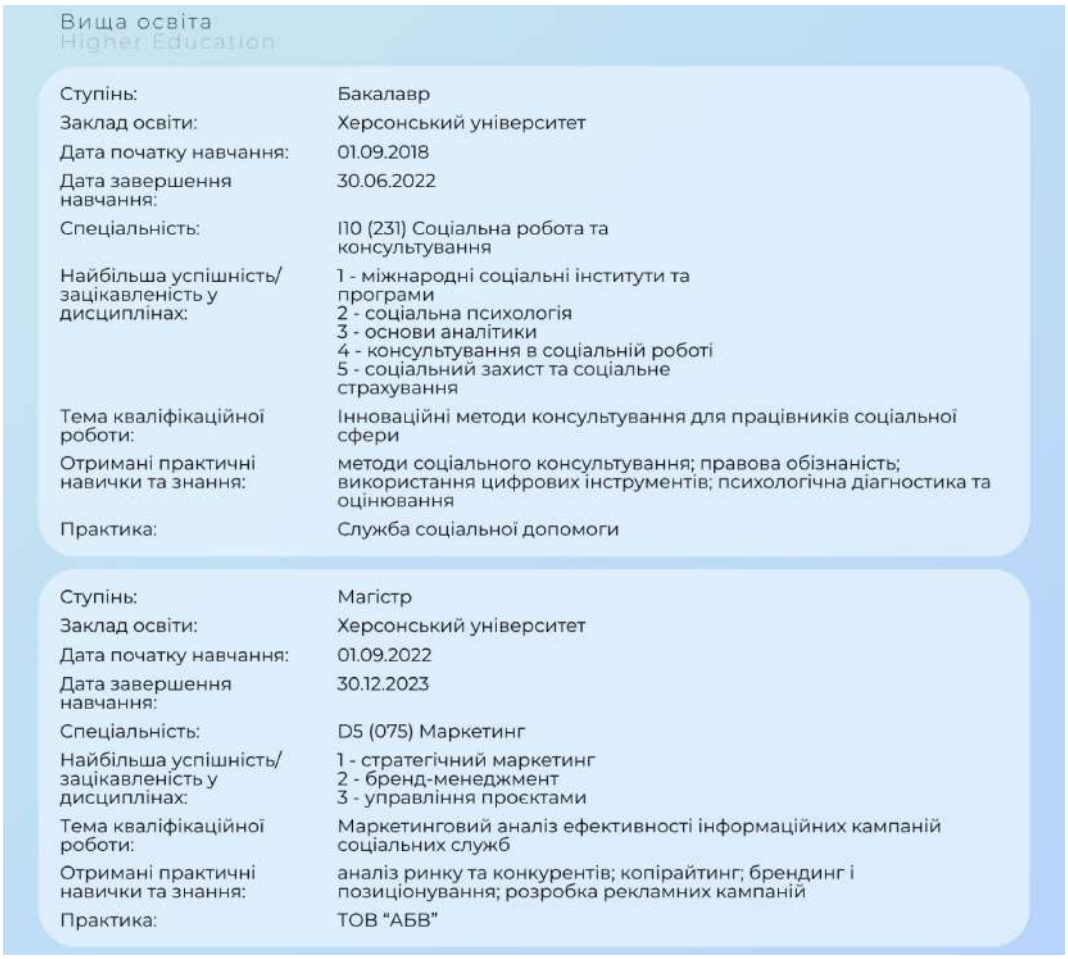


Повна (профільна) середня освіта
Upper (Vocational) Secondary Education

Заклад освіти:	Херсонський ліцей
Дата початку навчання:	01.09.2015
Дата завершення навчання:	30.05.2018
Профіль:	мовно-літературний
Найбільша успішність/ зацікавленість:	1 - іноземна мова (англійська) 2 - іноземна мова (іспанська) 3 - мистецтво 4 - географія 5 - історія світу
Показники психометричних тестів:	інтроверсія, логічність, організованість
Результати профорієнтаційних тестів/консультацій:	1 - викладач 2 - соціальний працівник 3 - журналіст (аналітичний відділ) 4 - працівник галузі культури (державна/місцева влада) 5 - ведуча пізнавальної програми
Рівень концентрації уваги (0-10):	8
Власні досягнення:	голова культурного відділу учнівського самоврядування; переможець ІІІ етапу з роботою МАН у секції "Теорія, історія мистецтв та арткритика"
Загальна характеристика:	цілеспрямована; старанна; проявляється і як генератор ідей, і як реалізатор; здатна зацікавити людей під час виступів; проявляє значну зацікавленість до наукового пошуку

Рис. 4. Ілюстрація розділу повної (профільної) середньої освіти у «єПортфоліо»

Джерело: власна розробка авторів



Вища освіта
Higher Education

Ступінь:	Бакалавр
Заклад освіти:	Херсонський університет
Дата початку навчання:	01.09.2018
Дата завершення навчання:	30.06.2022
Спеціальність:	І10 (231) Соціальна робота та консультування
Найбільша успішність/ зацікавленість у дисциплінах:	1 - міжнародні соціальні інститути та програми 2 - соціальна психологія 3 - основи аналітики 4 - консультування в соціальній роботі 5 - соціальний захист та соціальне страхування
Тема кваліфікаційної роботи:	Інноваційні методи консультування для працівників соціальної сфери
Отримані практичні навички та знання:	методи соціального консультування; правова обізнаність; використання цифрових інструментів; психологічна діагностика та оцінювання
Практика:	Служба соціальної допомоги

Ступінь:	Магістр
Заклад освіти:	Херсонський університет
Дата початку навчання:	01.09.2022
Дата завершення навчання:	30.12.2023
Спеціальність:	D5 (075) Маркетинг
Найбільша успішність/ зацікавленість у дисциплінах:	1 - стратегічний маркетинг 2 - бренд-менеджмент 3 - управління проєктами
Тема кваліфікаційної роботи:	Маркетинговий аналіз ефективності інформаційних кампаній соціальних служб
Отримані практичні навички та знання:	аналіз ринку та конкурентів; копірайтинг; брендинг і позиціонування; розробка рекламних кампаній
Практика:	ТОВ "АБВ"

Рис. 5. Ілюстрація розділу вищої освіти у «єПортфоліо»

Джерело: власна розробка авторів

за пріоритетами), рівень концентрації уваги, власні досягнення та загальна характеристика. Так само протягом здобуття повної середньої освіти профорієнтаційні заходи можуть проводить як з боку сфери освіти, так і сфери зайнятості, продовжуючи вирощування науковців та фахівців, надаючи інформацію про конкретні варіанти кар'єри, актуальні на момент завершення навчання учнем вакансії на вітчизняному (з пріоритетом рідного регіону) ринку праці.

Здобуваючи вищу чи професійно-технічну освіту, у молодої людини також формується відповідний розділ у портфоліо, де куратор групи чи інша відповідальна особа, протягом навчання фіксує інформацію про отримуваний ступінь, спеціальність, найбільшу успішність та зацікавленість у дисциплінах, конкретних напрямках тем, тему кваліфікаційної роботи, отримані практичні навички і знання та місце проходження практики. Такі дані допоможуть аргументувати молодим працівникам без досвіду праці власну компетентність, яка офіційно підтверджена закладом освіти, розуміти роботодавцем схильність людини до конкретного напрямку роботи, яка йому найбільш властива, та, знову ж, відбирати з наявної бази по регіону потенційних працівників та заохочувати їх долучення до працевлаштування.

Так само як і освітній досвід, доцільно реєструвати професійний, що автоматично з'являтиметься в портфоліо громадянина з інформацією про роботодавця, місце роботи, посаду та виконувані у її рамках обов'язки, загальну характеристику-рекомендації. Також додатковим блоком може йти підтверджена інформація про конкретні навички та знання (підвищення кваліфікації, рівень іноземної мови тощо за зареєстрованими у Державній службі зайнятості сертифікатами). Задля залучення працівників до «дефіцитних» галузей, держава чи приватні підприємства можуть пропонувати спеціалістам із суміжних сфер перекваліфікацію та гарантію працевлаштування.

Створення описаного портфоліо може слугувати елементом профорієнтаційної діяльності в Україні: з одного боку, надання корисного продукту для громадян, що демонструє уважність влади до їх потреб (сформоване особисте портфоліо з офіційно підтвердженою інформацією стане в пригоді і молодим фахівцям без досвіду роботи завдяки описаним навичкам та характеристикам, що були отримані у навчальних закладах, і вже досвідченим працівникам, місця зайнятості, посади та вміння яких також автоматично фіксуються та переносяться у портфоліо); з іншого боку, отримання державою бази даних з інформацією про схильності, здібності дітей, у яких

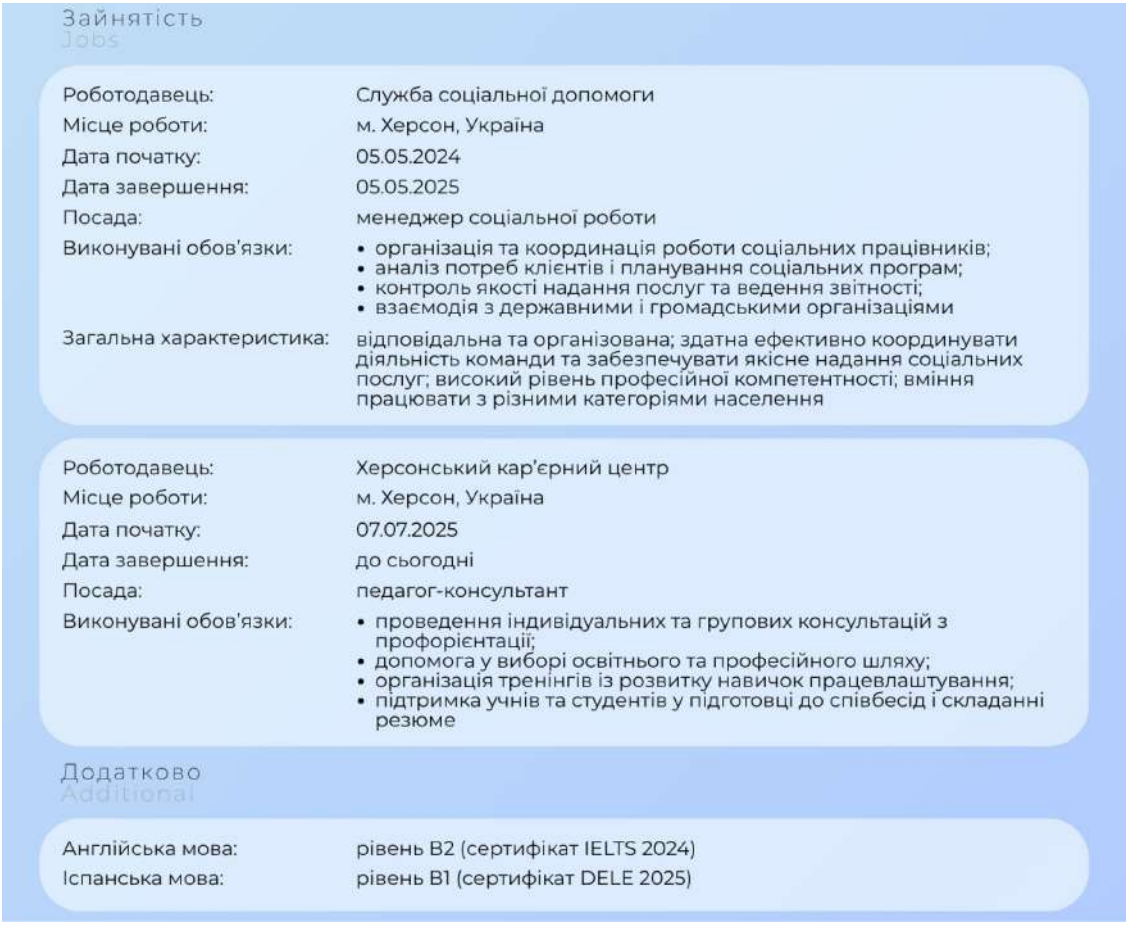


Рис. 6. Ілюстрація розділів зайнятості та додаткової інформації у «єПортфоліо»

Джерело: власна розробка авторів

доцільно активно формувати зацікавленість до конкретного фаху через заохочувальні заходи навчальних закладів та роботодавців.

Висновки

Генератором досягнення стратегічного бачення майбутнього держави завжди виступає публічна влада, що розкладає його на конкретні цілі і кроки, які зокрема і виконує. На це вона здатна лише завдяки ресурсам, які люди згодні їй надати. Найбільш цінними з ресурсів є, власне, людські (на відміну від природних, яким властиво лише завершуватись): люди виробляють інноваційні технології та обслуговують їх, люди працюють на прогрес, що потім працює на них.

Одним з основних аспектів ефективного управління людськими ресурсами є цілісна профорієнтаційна система, що пронизує як сферу освіти, так і зайнятості. За її відсутності Україна ризикує і надалі потрапляти в кризи нестачі кваліфікованих кадрів у важливих для держави галузях. Маючи єдину базу даних з інформацією про дітей зі схильностями до певних фахів, держава може застосовувати більш індивідуальний підхід до заохочення конкретного професійного вибору через профорієнтаційні заходи роботодавців та навчальних закладів.

Запропоновані підходи та інструменти удосконалення профорієнтаційної роботи в Україні дозволять владі продемонструвати уважність до потреб громадян, зокрема молодих майбутніх спеціалістів, та одночасно збирати дані про їх схильності та здібності задля індивідуального орієнтування на конкретні фахи. В майбутніх дослідженнях доцільно розглянути аспекти підготовки відповідальних осіб за збір інформації, технічного функціонування інструменту, проведення безпосередніх системних заходів орієнтації учнів та студентів на потрібні спеціальності тощо.

Список використаної літератури

1. Інженери на виробництвах оборонно-промислового комплексу – одна з дефіцитних професій на вітчизняному ринку праці. *Медіацентр Україна*. URL: https://mediacenter.org.ua/uk/inzheneri-na-virobnitstvah-oboronno-promislovogo-kompleksu-odna-z-defitsitnih-profesij-na-vitchiznyanomu-rinku-pratsi/

2. Лазарєва К. Вступники у 2025 році ігнорують технічні спеціальності. *The Page*. URL: https://thepage.ua/ua/news/vstup-2025-de-najbilshij-i-najmenshij-konkurs-na-byudzhet

3. МОН надає роз'яснення щодо коментарів стосовно переходу на 12-річну систему шкільної освіти в Україні. *Єдиний веб-портал органів виконавчої влади України | Урядовий портал*. URL: https://www.kmu.gov.ua/news/mon-nadaie-roziasnennia-shchodo-komentariv-stosovno-perekhodu-na-12-richnu-systemu-shkilnoi-osvity-v-ukrainy

4. Обери професію своєї мрії. Всеукраїнський проєкт з профорієнтації та побудови кар'єри. URL: https://hryoutest.in.ua/

5. Потреби молоді у профорієнтації. *U-Report Україна*. URL: https://ukraine.ureport.in/story/1919/

6. Про затвердження Положення про професійну орієнтацію молоді, яка навчається : Наказ М-ва освіти України від 02.06.1995 № 159/30/1526. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0198-95#Text

7. Fredriksen, Birger J.; Goh, Chor Boon; Lee, Sing-Kong; Tan, Jee-Peng. Toward a better future : education and training for economic development in Singapore since 1965 (English). World Bank. P. 19–20. URL: http://documents.worldbank.org/curated/en/121951468302724234

8. Guidance System in Ukraine. *Euroguidance Network*. URL: https://euroguidance.eu/guidance-systems-and-practice/national-guidance-systems/guidance-system-in-ukraine

9. Mishchenko M., Shapovalyuk K. Formation and development of vocational guidance work in Ukraine. *Psychological Journal*. 2021. No. 7. P. 51–56. URL: https://doi.org/10.31499/2617-2100.7.2021.234582

10. National guidance systems. *Euroguidance Network*. URL: https://euroguidance.eu/guidance-systems-and-practice/national-guidance-systems

References

1. Mediatsentr Ukraina. Inzhenery na vyrobnytstvakh oboronno-promyslovoho kompleksu – odna z defitsytnykh profesii na vitchyznianomu rynku pratsi [Engineers at defense-industrial complex enterprises – one of the scarce professions in the domestic labor market]. (in Ukrainian). URL: https://mediacenter.org.ua/uk/inzheneri-na-virobnitstvah-oboronno-promislovogo-kompleksu-odna-z-defitsitnih-profesij-na-vitchiznyanomu-rinku-pratsi/

2. Lazarieva, K. *Vstupnyky u 2025 rotsi ignoruiut tekhnichni spetsialnosti* [Applicants in 2025 ignore technical specialties]. *The Page*. (in Ukrainian). URL: https://thepage.ua/ua/news/vstup-2025-de-najbilshij-i-najmenshij-konkurs-na-byudzhet

3. Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy. *MON nadaie roziasnennia shchodo komentariv stosovno perekhodu na 12-richnu systemu shkilnoi osvity v Ukraini* [The Ministry of Education and Science provides clarification on comments regarding the transition to the 12-year school education system in Ukraine]. *Uriadovyi portal*. (in Ukrainian). URL: https://www.kmu.gov.ua/news/mon-nadaie-roziasnennia-shchodo-komentariv-stosovno-perekhodu-na-12-richnu-systemu-shkilnoi-osvity-v-ukrainy

4. Hryoutest. *Obery profesiiu svoiei mrii: Vseukrainskyi proiekt z proforiientatsii ta pobudovy karriery* [Choose the profession of your dream: All-Ukrainian project on career guidance and career building]. (in Ukrainian). URL: https://hryoutest.in.ua/

5. U-Report Ukraine. *Potreby molodi u proforiientatsii* [The needs of youth in career guidance]. (in Ukrainian). URL: https://ukraine.ureport.in/story/1919/

6. On approval of the Regulations on professional orientation of young people who study, Order of the Ministry of Education of Ukraine No. 159/30/1526 (1995) (Ukraine). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0198-95#Text

7. Fredriksen, B. J., Goh, C. B., Lee, S.-K., & Tan, J.-P. (2008). *Toward a better future: Education and training for economic development in Singapore since 1965*. World Bank. pp. 19–20. (in English). URL: http://documents.worldbank.org/curated/en/121951468302724234

8. Euroguidance Network. *Guidance system in Ukraine*. (in English). URL: https://euroguidance.eu/guidance-systems-and-practice/national-guidance-systems/guidance-system-in-ukraine

9. Mishchenko M., Shapovalyuk K. (2021). Formation and development of vocational guidance work in Ukraine. *Psychological Journal*. No. 7. P. 51–56. (in Ukrainian). URL: https://doi.org/10.31499/2617-2100.7.2021.234582

10. Euroguidance Network. *National guidance systems*. (in English). URL: https://euroguidance.eu/guidance-systems-and-practice/national-guidance-systems

Дата першого надходження рукопису до видання: 17.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 14.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

УДК 351.86.07:[332.1:338.246.8]](477)»366’’(045) DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.51

Є. І. ТАРАН
кандидат політичних наук, доцент,
доцент кафедри глобальної та національної безпеки
Навчально-науковий інститут публічного управління
та державної служби
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
ORCID: 0000-0002-1822-6978

МЕХАНІЗМИ ДЕРЖАВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ БЕЗПЕКОВИМ ПОТЕНЦІАЛОМ РЕГІОНІВ В УМОВАХ ПІСЛЯВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ

Одним із завдань сучасного державного управління є збереження національної безпеки та стійкості держави. В той же час, післявоєнне відновлення територій України потребує застосування спеціалізованих державних механізмів, які поєднують регулювання безпекових процесів із соціально-економічним відновленням. Важливе місце в цьому процесі займає питання ефективного управління безпековим потенціалом регіонів, оскільки значна частина державної політики, яка впливає на соціально-економічну стабільність, захист населення та інтеграцію регіональних пріоритетів у загальнонаціональні стратегії безпеки реалізується саме на субнаціональному рівні. Мета статті полягає в аналізі механізмів державного регулювання регіонів та визначенні основних інструментів, які взаємодіють для збереження безпеки та сприяють соціально-економічному відновленню територій. Здійснено аналіз нормативно-правових актів, узагальнено практичний досвід регіонального управління, сформовано інтегрований механізм підвищення безпекового потенціалу та забезпечення стійкості регіональних систем перед соціально-економічними, військовими та природно-техногенними загрозами. Визначено механізми державного регулювання у сфері безпеки та соціально-економічного відновлення регіонів України, які поєднують законодавчі, фінансові, інституційні та інформаційні інструменти, і взаємодіють для збереження безпеки та відновлення територій.

Зроблено висновок, що реалізація післявоєнного відновлення українських регіонів може бути здійснена шляхом впровадження централізованих програм, які включають в себе заходи з відбудови критичної інфраструктури, житлового фонду, соціальних послуг, підтримку бізнесу та аграрного сектору. Отримані результати засвідчують те, що такий комплекс заходів має на меті не лише забезпечити економічне та соціальне відновлення післявоєнних територій, але й підвищити та зміцнити безпековий потенціал регіонів України.

Ключові слова: *безпековий потенціал регіону, національна безпека, регіональна політика, стратегічне планування, післявоєнне відновлення, механізми державного регулювання.*

YE. I. TARAN
PhD in Political Science, Associate Professor,
Associate Professor at the Global and National Security Department
Educational and Scientific Institute of Public Administration and Civil Service
of Taras Shevchenko National University of Kyiv
ORCID: 0000-0002-1822-6978

THE ROLE OF REGIONAL SECURITY POTENTIAL MANAGEMENT IN THE TRANSFORMATION OF NATIONAL SECURITY POLICY

One of the tasks of modern public administration is to preserve national security and stability of the state. At the same time, the post-war restoration of the territories of Ukraine requires the use of specialized state mechanisms that combine the regulation of security processes with socio-economic restoration. An important place in this process is occupied by the issue of effective management of the security potential of regions, since a significant part of state policy that affects socio-economic stability, protection of the population and integration of regional priorities into national security strategies is implemented at the subnational level. The purpose of the article is to analyze the mechanisms of state regulation of regions and identify the main instruments that interact to preserve security and contribute to the socio-economic restoration of territories. An analysis of regulatory and legal acts has been carried out, practical experience of regional management has been summarized, an integrated mechanism for increasing the security potential and ensuring the stability of regional systems in the face of socio-economic, military and natural and technological threats has been formed. The mechanisms of state regulation in the field of security and socio-economic recovery of the regions of Ukraine are identified, which combine legislative, financial, institutional and informational tools, and interact to maintain security and restore the territories.

Summarized that the implementation of post-war recovery of Ukrainian regions can be carried out through the implementation of centralized programs that include measures to rebuild critical infrastructure, housing, social

© Таран Є. І., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

services, support for business and the agricultural sector. Such a set of measures is aimed not only at ensuring the economic and social recovery of post-war territories, but also at increasing and strengthening the security potential of the regions of Ukraine.

Key words: *regional security potential, national security, regional policy, strategic planning, post-war recovery, mechanisms of state regulation.*

Постановка проблеми

Одним із завдань сучасного державного управління є збереження національної безпеки та стійкості держави. Важливе місце в цьому процесі займає питання ефективного управління безпековим потенціалом регіонів, оскільки значна частина державної політики, яка впливає на соціально-економічну стабільність, захист населення та інтеграцію регіональних пріоритетів у загальнонаціональні стратегії безпеки реалізується саме на субнаціональному рівні.

Науковий внесок даної роботи полягає в комплексному аналізі системи управління безпековим потенціалом регіону, що сприятиме інтеграції регіональних інтересів у державні стратегії безпеки, підвищенню ефективності регуляторних механізмів та прискоренню відбудови територій після воєнних конфліктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика управління безпековим потенціалом на регіональному рівні активно досліджується в сучасних наукових працях. Так, регіональні тенденції формування зовнішніх чинників впливу на систему національної безпеки України вивчає В. Бондар, який в своїй роботі «Регіональні тенденції формування зовнішніх факторів впливу на систему національної безпеки України» [1] підкреслює важливість регіонального аспекту у формуванні державних стратегій. актуальним для адаптації управлінських підходів на регіональному рівні. Актуальним для адаптації управлінських підходів на регіональному рівні є явище державного управління національною безпекою в умовах геополітичних трансформацій, яке досліджується науковицею В. Загурською-Антонюк в монографії «Державне управління національною безпекою в умовах геополітичних трансформацій» [2]. Дослідники А. Войцещук, І. Гуцул та В. Мартинюк в роботі «Інституційно-правовий механізм публічного управління у сфері захисту корпоративних прав в Україні» [3] аналізують інституційно-правовий механізм публічного управління у сфері захисту корпоративних прав, що дає змогу оцінити правові аспекти безпеки на рівні регіонів. М. Волосюк роботі «Концептуалізація забезпечення місцевого економічного розвитку: зарубіжний досвід і можливості його адаптації в Україні» [4] проводить аналіз місцевого економічного розвитку та розглядає можливості адаптації закордонного досвіду, який може сприяти зміцненню регіонального безпекового потенціалу. В роботі «Регіональна економічна інтеграція як інструмент зміцнення національної безпеки України» [5] А. Падалка наголошує на важливості економічних зв'язків для стабілізації безпекових процесів на регіональному та національному рівнях.

Як видно, з наведеного вище аналізу, більшість науковців зосереджуються на загальних питаннях національної безпеки чи окремих аспектах регіональної політики, не враховуючи специфіки післявоєнного відновлення та соціально-економічних викликів різних територій, що говорить про надзвичайну актуальність даного дослідження.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження – проаналізувати механізми державного регулювання регіонів та визначити основні інструменти, які взаємодіють для збереження безпеки та сприяють соціально-економічному відновленню територій. Це дозволить обгрунтувати науково-методичні засади управління безпековим потенціалом регіону, підвищить ефективність державної політики національної безпеки та забезпечить післявоєнне відновлення регіонів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Загальновизнаним є той факт, що під національною безпекою розуміється це здатність держави та її регіональних суб'єктів зберігати стійкість перед комплексними загрозами, що виникають як на міжнародному, так і на локальному рівнях. Через це, безпековий потенціал регіону проявляється у значенні важливого державного ресурсу, що забезпечує соціально-економічну стабільність, функціонування критичної інфраструктури та ефективну взаємодію інституцій влади [6].

В той же час, існує комплекс державних інструментів, за допомогою яких здійснюється управління безпековим потенціалом регіону. До них відносяться – стратегічне планування, координація дій центральних і місцевих органів влади, розробка регіональних програм безпеки, інтегрованих у державну політику, а також застосування методів кризового управління та залучення громадських та приватних структур. Ефективність управління базується на системному підході, який, в свою чергу, включає в себе оцінку загроз, ідентифікацію ресурсів та впровадження комплексних механізмів державного регулювання, до яких відносяться мобілізація людського та економічного капіталу, стратегічне планування та розвиток інфраструктури, інтеграція праовових, фінансово-економічних та адміністративних інструментів гарантування безпеки.

Механізми державного регулювання безпекового потенціалу регіону передбачають правове, організаційне та фінансово-економічне забезпечення. Правовий аспект охоплює нормативно-правові акти, що визначають компетенції органів влади та порядок реагування на загрози. Організаційний – створення координаційних рад,

кризових штабів та міжвідомчих груп для оперативного реагування. Фінансово-економічний – виділення коштів, стимулювання інвестицій у критичну інфраструктуру та підтримку соціальних програм для зміцнення стабільності регіону [7].

Регулювання безпекового потенціалу передбачає системний аналіз ризиків, моніторинг внутрішніх і зовнішніх загроз, прогнозування їхніх наслідків та розробку стратегій мінімізації негативного впливу. Центральні органи влади визначають пріоритетні напрями політики національної безпеки, тоді як регіональні адміністрації адаптують ці стратегії до локальних умов, забезпечуючи баланс між централізованим управлінням і регіональною автономією. Такий підхід дає змогу підвищити ефективність заходів безпеки, знизити соціальну напругу та забезпечити стійкий розвиток територій.

Вплив регіонального рівня на трансформацію державної політики національної безпеки проявляється у формуванні нових підходів на загальнодержавному рівні через активну участь регіональних структур у визначенні пріоритетів безпеки та адаптації стратегічних рішень до місцевих умов. Регіональні ініціативи та процеси децентралізації підвищують ефективність національної безпеки, адже дають змогу враховувати соціально-економічну специфіку, геополітичне розташування та ресурси кожного регіону. Модель «знизу догори» забезпечує інтеграцію місцевих програм та ініціатив у державні стратегії, що підвищує оперативність реагування на загрози та гнучкість системи управління.

Основні механізми державного регулювання у сфері безпеки та соціально-економічного відновлення регіонів України наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Основні механізми державного регулювання у сфері безпеки та соціально-економічного відновлення регіонів України

Механізм державного регулювання	Законодавча база / нормативно-правовий акт	Функції та призначення
Законодавче регулювання повноважень	Закон України «Про основи національної безпеки України» (2018)	Визначає повноваження центральних і регіональних органів у сфері національної безпеки
Координаційні ради та комісії	Постанова Кабінету Міністрів № 1317 (2022)	Забезпечує міжвідомчу координацію дій у разі надзвичайних ситуацій та відновленні територій
Цільове фінансування регіонів	Бюджетний кодекс України, Закон України «Про Державний бюджет»	Фінансова підтримка відновлення інфраструктури та соціально-економічних програм
Податкові стимули для відновлення економіки	Податковий кодекс України	Сприяє залученню інвестицій та відновленню бізнес-активності в постраждалих регіонах
Інформаційні та аналітичні системи	Накази Міністерства розвитку громад та територій, МВС	Моніторинг загроз, стану інфраструктури та потреб населення; забезпечує обмін інформацією між органами влади
Протоколи дій під час надзвичайних ситуацій	Накази ДСНС України	Встановлюють алгоритми взаємодії силових та соціальних структур у кризових ситуаціях

Джерело: створено автором на основі [8; 9 ; 10 ; 11; 12; 13]

Дані табл. 1 показують, що механізми державного регулювання поєднують законодавчі, фінансові, інституційні та інформаційні інструменти, які взаємодіють для збереження безпеки та відновлення територій. Законодавча база встановлює межі повноважень центральних і регіональних органів влади, а нормативно-правові акти та постанови визначають алгоритми координації, розподіл ресурсів та контроль за виконанням заходів. Інформаційні та аналітичні системи дають змогу своєчасно оцінювати потреби населення, стан інфраструктури та ефективність реалізації програм, що є критично важливим для післявоєнного відновлення територій.

Післявоєнне відновлення територій України потребує застосування спеціалізованих державних механізмів, які поєднують регулювання безпекових процесів із соціально-економічним відновленням. Центральні та регіональні органи влади координують дії через цільові державні програми, бюджети відновлення й міжвідомчі координаційні ради. Важливу роль відіграють нормативно-правові акти, які встановлюють порядок планування, фінансування та контролю за виконанням програм відновлення. До основних документів належать: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.12.2022 № 1219-р «Про затвердження плану дій органів виконавчої влади з відновлення деокупованих територій територіальних громад» [14], Закон України «Про внесення змін до Закону України «Про Державний бюджет України на 2023 рік» (щодо фінансування відновлення та ліквідації наслідків бойових дій) [15], а також міжвідомчі накази Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України і Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС).

Післявоєнне відновлення українських регіонів здійснюється через централізовані програми, які охоплюють відбудову критичної інфраструктури, житлового фонду, соціальних послуг, підтримку бізнесу та аграрного сектору. Такий комплексний підхід не лише забезпечує економічне та соціальне відновлення територій, але й безпосередньо впливає на формування та зміцнення безпекового потенціалу регіону. Відновлення критично важливих

об'єктів інфраструктури підвищує здатність регіональних систем оперативно реагувати на загрози та забезпечує безперервність життєдіяльності місцевих громад. Реалізація соціальних і житлових програм сприяє стабілізації населення, зниженню соціальної напруженості та локальних конфліктів, що підвищує рівень соціальної стійкості територій. Підтримка малого та середнього бізнесу відновлює економічну активність, що сприяє зниженню економічної вразливості регіону й підвищує його автономність у контексті кризових ситуацій.

Основні післявоєнні програми відновлення територій України та механізми їхньої реалізації представлено в табл. 2.

Таблиця 2

Основні післявоєнні програми відновлення територій України та механізми їхньої реалізації

Програма	Основні цілі та завдання	Приклади реалізації в регіонах
План відновлення постраждалих територій	Координація відновлення критичної інфраструктури, соціальної сфери та економіки	Київська, Харківська, Донецька області
Фінансування відновлення	Цільове фінансування відбудови житлових та соціальних об'єктів	Львівська, Запорізька, Херсонська області
Програма підтримки малого та середнього бізнесу	Субсидії та податкові пільги для відновлення підприємницької діяльності	Дніпропетровська, Одеська області
Відновлення житлового фонду	Реконструкція житлових будинків, забезпечення тимчасовим житлом ВПО	Чернігівська, Сумська області
Соціальні та освітні програми	Відновлення шкіл, дитсадків, медичних закладів	Київська, Луганська, Хмельницька області

Джерело: створено автором

Аналіз основних післявоєнних програм, представлених у табл. 2, показує, що законодавча та нормативно-правова база визначає механізми координації дій центральних і регіональних органів влади, планування ресурсів та моніторингу реалізації заходів. Цільове фінансування, податкові пільги й субсидії для бізнесу, а також реконструкція житлового та соціального секторів сприяють поверненню внутрішньо переміщених осіб і відновленню життєздатності місцевих громад. У комплексі ці заходи формують інтегрований механізм підвищення безпекового потенціалу регіону в умовах післявоєнного відновлення.

Висновки

Проаналізовано механізми управління безпекою регіонів в умовах післявоєнного відновлення України. Визначено механізми державного регулювання у сфері безпеки та соціально-економічного відновлення регіонів України, які поєднують законодавчі, фінансові, інституційні та інформаційні інструменти, і взаємодіють для збереження безпеки та відновлення територій. При цьому, зазначено законодавчу базу, що регламентує функції та призначення центральних і регіональних органів влади, а нормативно-правові акти та постанови визначають алгоритми координації, розподіл ресурсів та контроль за виконанням заходів. До того-ж, вказані нормативно-правові акти встановлюють порядок планування, фінансування та контролю за виконанням програм відновлення.

При цьому, реалізація післявоєнного відновлення українських регіонів може бути здійснена шляхом впровадження централізованих програм, які включають в себе заходи з відбудови критичної інфраструктури, житлового фонду, соціальних послуг, підтримку бізнесу та аграрного сектору. Впровадження вказаних післявоєнних програм дозволить стабілізувати стан населення, сприяти зниженню соціальності напруженості та локальних конфліктів, що має підвищити соціальну стійкість регіонів, особливо в умовах післявоєнного відновлення.

Такий комплекс заходів має на меті не лише забезпечити економічне та соціальне відновлення післявоєнних територій, але й підвищити та зміцнити безпековий потенціал регіонів України.

Подальші наукові дослідження повинні бути присвячені формуванням адаптивних моделей національної безпеки на регіональному рівні з урахуванням глобальних та післявоєнних викликів і загроз.

Список використаної літератури

1. Бондар В. Т. Регіональні тенденції формування зовнішніх факторів впливу на систему національної безпеки України. *Дніпровський науковий часопис публічного управління, психології, права*. 2023. № 3. DOI: https://doi.org/10.51547/ppp.dp.ua/2023.3.7

2. Загурська-Антонюк В. Ф. Державне управління національною безпекою в умовах геополітичних трансформацій: монографія. Житомир, 2020. 336 с. URL: http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/8058

3. Войцещук А. Д., Гуцул І. А., Мартинюк В. А. Інституційно-правовий механізм публічного управління у сфері захисту корпоративних прав в Україні. *Наука і техніка сьогодні*. 2025. № 7(48). С. 59–75. DOI: https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-7(48)-59-75

4. Волосюк М. В. Концептуалізація забезпечення місцевого економічного розвитку: зарубіжний досвід і можливості його адаптації в Україні. *Бізнес Інформ*. 2022. № 12. С. 154–163. DOI: https://doi.org/10.32983/2222-4459-2022-12-154-163

5. Падалка А. М. Регіональна економічна інтеграція як інструмент зміцнення національної безпеки України. *Регіональна економіка*. 2025. № 1(115). С. 70–81. DOI: https://doi.org/10.36818/1562-0905-2025-1-6

6. Домбровська С., Помаза-Пономаренко А., Порока С., Урбанек А. Безпекова політика України в умовах євроінтеграції : монографія. Харків, 2023. 252 с. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/18785/1/MonDPPU.pdf.

7. Mitrovic M. Assessments and foreign policy implementation of the national security of Republic of Serbia. *Security and Defence Quarterly*. 2021. Vol. 34. № 2. P. 7–19 DOI: https://doi.org/10.35467/sdq/135592

8. Про основи національної безпеки України: Закон України від 21.06.2018 № 2469-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19#Text

9. Про місцеве самоврядування в Україні : Закон України від 21.05.1997 № 280/97-ВР. Редакція від 08.08.2025. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/280/97-%D0%B2%D1%80#Text

10. Про затвердження Порядку відновлення інфраструктури у постраждалих територіях: Постанова Кабінету Міністрів України від 22.12.2022 № 1317. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1317-2022-п#Text

11. Бюджетний кодекс України. Документ № 2456-VI. Редакція від 04.07.2025. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2456-17#Text

12. Про Державний бюджет України на 2023 рік: Закон України. Документ 2710-IX. Редакція від 22.10.2023. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2710-20#Text

13. Податковий кодекс України. Документ 2755-VI. Редакція від 01.08.2025. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#Text

14. Про затвердження плану дій органів виконавчої влади з відновлення деокупованих територій територіальних громад: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30.12.2022 № 1219-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1219-2022-%D1%80#Text

15. Про внесення змін до Закону України «Про Державний бюджет України на 2023 рік». Документ 3166-IX. Прийняття від 29.06.2023. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3166-20#Text

References

1. Bondar, V. T. (2023). Rehionalni tendentsii formuvannia zovnishnikh faktoriv vplyvu na systemu natsionalnoi bezpeky Ukrainy [Regional trends in the formation of external influence factors on the national security system of Ukraine]. *Dniprovskyi naukovyi chasopys publichnoho upravlinnia, psykholohii, prava – Dnipro Scientific Journal of Public Administration, Psychology, Law*, *3*. https://doi.org/10.51547/ppp.dp.ua/2023.3.7 [in Ukrainian].

2. Zahurska-Antoniuk, V. F. (2020). *Derzhavne upravlinnia natsionalnoiu bezpekoiu v umovakh heopolitychnykh transformatsii: monohrafiia* [Public administration of national security in the context of geopolitical transformations: monograph]. Zhytomyr: O.O. Yevenok. Retrieved from http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/8058 [in Ukrainian].

3. Voitsekshuk, A. D., Hutsul, I. A., & Martyniuk, V. A. (2025). Instytutsiino-pravovyi mekhanizm publichnoho upravlinnia u sferi zakhystu korporatyvnykh prav v Ukraini [Institutional and legal mechanism of public administration in the field of corporate rights protection in Ukraine]. *Nauka i tekhnika siogodni – Science and Technology Today*, *7*(48), 59–76. https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-7(48)-59-75 [in Ukrainian].

4. Volosiuk, M. V. (2022). Kontseptualizatsiia zabezpechennia mistsevoho ekonomichnoho rozvytku: zarubizhnyi dosvid i mozhlyvosti yoho adaptatsii v Ukraini [Conceptualization of local economic development: foreign experience and possibilities of adaptation in Ukraine]. *Biznes Inform – Business Inform*, *12*, 154–163. https://doi.org/10.32983/2222-4459-2022-12-154-163 [in Ukrainian].

5. Padalka, A. M. (2025). Rehionalna ekonomichna intehratsiia yak instrument zmihtnennia natsionalnoi bezpeky Ukrainy [Regional economic integration as a tool for strengthening Ukraine's national security]. *Rehionalna ekonomika – Regional Economy*, *115*(1), 70–81. https://doi.org/10.36818/1562-0905-2025-1-6 [in Ukrainian].

6. Dombrovska, S., Pomaza-Ponomarenko, A., Poroka, S., & Urbanek, A. (2023). *Bezpekova polityka Ukrainy v umovakh yevrointehratsii: monohrafiia* [Security policy of Ukraine in the context of European integration: monograph]. Kharkiv : NUTSU. Retrieved from http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/18785/1/MonDPPU.pdf [in Ukrainian].

7. Mitrovic, M. (2021). Assessments and foreign policy implementation of the national security of Republic of Serbia. *Security and Defence Quarterly, 34*(2), 7–19. https://doi.org/10.35467/sdq/135592 [in English].

8. Verkhovna Rada of Ukraine. (2018). On the Fundamentals of National Security of Ukraine: Law of Ukraine dated 21.06.2018 № 2469-VIII. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19#Text [in Ukrainian].

9. Verkhovna Rada of Ukraine. (1997). On Local Self-Government in Ukraine: Law of Ukraine dated 05.21.1997 № 280/97-BP. Revision dated 08.08.2025. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/280/97-%D0%B2%D1%80#Text [in Ukrainian].

10. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2022). On approval of the Procedure for restoring infrastructure in the affected territories: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 12.22.2022 № 1317. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1317-2022-п#Text [in Ukrainian].

11. Verkhovna Rada of Ukraine. (2010). Budget Code of Ukraine. Document № 2456-VI. Edition dated 04.07.2025. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2456-17#Text [in Ukrainian].

12. Verkhovna Rada of Ukraine (2023). On the State Budget of Ukraine for 2023: Law of Ukraine. Document № 2710-IX. Edition dated 10.22.2023. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2710-20#Text [in Ukrainian].

13. Verkhovna Rada of Ukraine. (2010). Tax Code of Ukraine. Document № 2755-VI. Revision dated 01.08.2025. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#Text [in Ukrainian].

14. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2022). On approval of the action plan of executive authorities for the restoration of deoccupied territories of territorial communities: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 12.30.2022. № 1219-r. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1219-2022-%D1%80#Text [in Ukrainian].

15. Verkhovna Rada of Ukraine. (2022). On Amendments to the Law of Ukraine "On the State Budget of Ukraine for 2023". Document № 3166-IX. Adopted on 06.29.2023. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3166-20#Text [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 20.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ ТЕХНІЧНИХ НАУК

УДК 681.518.5:629.735.33 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.52

М. А. ГРИНЬОВ
аспірант кафедри комп'ютерних систем
Національний університет «Одеська політехніка»
ORCID: 0009-0007-7189-4485

О. В. СТРЕЛЬЦОВ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних систем
Національний університет «Одеська політехніка»
ORCID: 0000-0002-4691-5703

МЕЖІ ПАСИВНОЇ ДІАГНОСТИКИ ЗМІЩЕННЯ СЕНСОРА ЗА ОДНОЧАСНИХ ЗМІН СЕРЕДОВИЩА ТА ОБ'ЄКТА

Розглянуто задачу пасивної діагностики зміщення сенсора в замкненій системі керування, коли одночасно зі зміщенням можуть змінюватися зовнішні умови (вітер) і параметри об'єкта (маса, аеродинамічний опір, тяга), а модель об'єкта сама має похибку. Мета роботи – встановити, за яких умов і з якою роздільною здатністю зміщення сенсора можна відрізнити від таких змін за доступними вимірюваннями, а також оцінити втрати від невідомого моменту виникнення несправності. Для лінійно-гауссової моделі замкненої системи введено профільовану інформацію Фішера щодо зміщення з урахуванням апріорних розподілів параметрів збурення і мінімальне виявлюване зміщення. Доведено, що зворотний зв'язок не змінює діагностовності адитивних несправностей; що існують два режими – обмежений швидкістю, у якому мінімальне виявлюване зміщення зменшується обернено пропорційно кореню з тривалості спостереження, і обмежений порогом, у якому воно прямує до ненульової межі; отримано замкнений вираз межі як апріорної вартості найдешевшого еквівалентного збурення; сформульовано структурну умову «невидимого зсуву рівноваги», за якої момент виникнення несправності не несе інформації; показано, що статична похибка аеродинамічної моделі еквівалентна усталеній зміні погодних умов. На моделі безпілотного літального апарата Aerosonde встановлено, що завищення показу приймача повітряного тиску на 1 м/с на швидкості 20 м/с еквівалентне зустрічному вітру 1 м/с разом зі збільшенням маси на 9,8 %, зменшенням паразитного опору на 39 % і збільшенням тяги на 5,3 %; межа роздільної здатності становить 0,90–1,23 м/с на швидкостях 20–27 м/с і пропорційна апріорній невизначеності параметрів. Монітор, що довіряє моделі літака, втрачає близько 0,5 м/с роздільної здатності на кожен відсоток статичної похибки аеродинамічних похідних, тоді як монітор, що оцінює масу, опір і тягу, зберігає роздільну здатність, близьку до межі. Невідомий момент виникнення збільшує поріг виявлення в 1,35–2,0 раза; кінематична перевірка, поширена в автопілотах, не розрізняє зміщень, менших приблизно за 5 м/с.

Ключові слова: *діагностовність, зміщення сенсора, інформація Фішера, апріорна невизначеність, виявлення змін, похибка моделі, приймач повітряного тиску, безпілотний літальний апарат.*

M. A. HRYNYOV
PhD Student at the Department of Computer Systens
Odesa Polytechnic National University
ORCID: 0009-0007-7189-4485

O. V. STRELTSOV
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Computer Systems Department
Odesa Polytechnic National University
ORCID: 0000-0002-4691-5703

LIMITS OF PASSIVE SENSOR OFFSET DIAGNOSIS UNDER SIMULTANEOUS ENVIRONMENT AND PLANT CHANGES

The paper considers passive diagnosis of a sensor offset in a closed-loop control system when, simultaneously with the offset, the environment (wind) and the plant parameters (mass, aerodynamic drag, thrust) may change, while the plant model itself is inaccurate. The aim of the work is to establish under which conditions and with what resolution a sensor

offset can be distinguished from such changes using the available measurements, and to estimate the losses caused by an unknown fault onset time. For a linear-Gaussian model of the closed loop, the profiled Fisher information about the offset, accounting for the prior distributions of the nuisance parameters, and the minimal detectable offset are introduced. It is proved that feedback does not change the diagnosability of additive faults; that there are two regimes – rate-limited, in which the minimal detectable offset decreases in inverse proportion to the square root of the observation time, and floor-limited, in which it tends to a nonzero limit; a closed-form expression of the limit is obtained as the prior cost of the cheapest equivalent nuisance; a structural condition of an "invisible equilibrium shift" is formulated under which the fault onset carries no information; it is shown that a static error of the aerodynamic model is equivalent to a steady change of weather conditions. On the model of the Aerosonde unmanned aerial vehicle it is established that a pitot-static airspeed reading 1 m/s too high at 20 m/s is equivalent to a 1 m/s headwind together with a 9.8 % mass increase, a 39 % parasite-drag decrease and a 5.3 % thrust increase; the resolution limit is 0.90–1.23 m/s at 20–27 m/s and is proportional to the prior parameter uncertainty. A monitor that trusts the aircraft model loses about 0.5 m/s of resolution per percent of static error in the aerodynamic derivatives, whereas a monitor that estimates mass, drag and thrust retains a resolution close to the limit. An unknown onset increases the detection threshold by a factor of 1.35–2.0; a kinematic check common in autopilots does not resolve offsets smaller than about 5 m/s.

Key words: *diagnosability, sensor offset, Fisher information, prior uncertainty, change detection, model error, pitot-static sensor, unmanned aerial vehicle.*

Вступ (постановка проблеми)

Достовірність вимірювань є необхідною умовою роботи автономних сенсорних систем. Для малих безпілотних літальних апаратів (БпЛА) однією з найчастіших несправностей є систематичне зміщення показу приймача повітряного тиску внаслідок потрапляння води, обмерзання чи забруднення [1–3]. Особливість такої несправності полягає в тому, що вона часто виникає одночасно зі зміною погодних умов, які змінюють і сам об'єкт: обмерзання й опади збільшують масу та опір літака, а порив вітру змінює повітряну швидкість так само, як її змінило б зміщення сенсора. Типові для автопілотів перевірки є кінематичними: показ повітряної швидкості порівнюють із путьовою швидкістю від супутникової навігаційної системи з урахуванням оцінки вітру.

Звідси виникає питання, яке передує розробленню будь-якого алгоритму діагностики: чи можна взагалі відрізнити зміщення сенсора від одночасних змін середовища та об'єкта за доступними вимірюваннями, і якщо так, то з якою роздільною здатністю та за який час? Відповідь визначає межі, яких не може перевершити жоден пасивний монітор, і показує, коли для діагностики потрібні додаткові сенсори або активне збудження (маневр).

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Діагностиці несправностей сенсорів повітряних даних присвячено низку робіт. У [1] запропоновано модельну діагностику несправностей вимірювання повітряної швидкості БпЛА; у [2] – виявлення та ізоляцію несправностей повітряних даних малих БпЛА в рамках моніторингу цілісності; огляд 2024 р. [3] систематизує модельні методи і методи на основі даних; у [4] синтезовано робастні фільтри для блокувань приймача з урахуванням невизначеності моделі. Ці роботи пропонують детектори, але не встановлюють меж діагностовності за одночасних змін об'єкта.

Кількісні показники діагностовності стохастичних лінійних систем на основі дивергенції Кульбака – Лейблера запропоновано в [5].Необхідні й достатні умови діагностовності розімкнених і замкнених стохастичних систем отримано в [6] із використанням відстані Бхаттачар'ї; там же відзначено відмінність між розімкненим і замкненим контуром. Структурні умови ізоляції несправностей (ідеальне розв'язання) класично розглянуто в [7], метод узагальненого відношення правдоподібності для стрибків у лінійних системах – у [8]. Найшвидше виявлення змін за наявності «завадової» зміни досліджено в [9], а у 2024 р. – за наявності «плутаної» зміни для незалежних спостережень з відомими розподілами [10]; асимптотику затримки виявлення дає класичний результат [11].

Невирішеною частиною проблеми є межі пасивної діагностики зміщення сенсора в замкненій системі, коли завада включає параметри об'єкта з апріорною невизначеністю, а модель об'єкта неточна: за яких структурних умов роздільна здатність обмежена знизу, чому дорівнює ця межа, як на неї впливає похибка моделі та невідомий момент виникнення несправності.

Мета та завдання дослідження

Метою роботи є встановлення меж пасивної діагностики зміщення сенсора в замкненій системі керування за одночасних змін середовища і параметрів об'єкта та за похибки моделі об'єкта.

Завдання дослідження:

1) сформулювати задачу діагностовності зміщення з урахуванням завад зі спільним моментом виникнення та апріорних розподілів параметрів;

2) встановити вплив зворотного зв'язку на діагностовність і структурні умови двох режимів – обмеженого швидкістю і обмеженого порогом;

3) отримати замкнений вираз межі роздільної здатності та її фізичну інтерпретацію;

4) оцінити вплив статичної похибки моделі об'єкта і невідомого моменту виникнення несправності;

5) перевірити результати на моделі БпЛА Aerosonde і на другому об'єкті, порівняти з практичними методами контролю.

Методологія

Дослідження ґрунтується на математичному моделюванні замкнених лінійно-гауссових систем, теорії статистичних рішень та інформації Фішера, методі сигнатур нев'язок фільтра Калмана [8] і методі узагальненого відношення правдоподібності. Теоретичні оцінки перевірено статистичним моделюванням на нелінійній моделі-двійнику літака і на моделі двох послідовно з'єднаних резервуарів; програмне забезпечення розроблено авторами мовою Python. Гіпотези, правила рішень і обсяги вибірок фіксували в протоколах до виконання розрахунків; гіпотези, що не підтвердилися, наведено в тексті.

Під час дослідження використано генеративну мовну модель Claude (Anthropic) як допоміжний інструмент для пошуку й аналізу літератури, розроблення програмного коду моделювання, перевірки аналітичних викладок, оброблення результатів і підготовки тексту. Усі отримані результати, обчислення та висновки перевірено авторами, які несуть повну відповідальність за зміст статті.

Викладення основного матеріалу

Постановка задачі

Розглянемо лінеаризовану модель замкненої системи

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + Gw_k + N_x\eta + F_x b, \quad y_k = Cx_k + D_u u_k + v_k + G_\eta \eta + fb, \tag{1}$$

де b – величина зміщення сенсора (відома форма появи, наприклад сходинка в момент k_0); η – вектор величин завад зі спільним моментом появи (складові вітру, зміни маси, опору, тяги); w_1, v_k – білі гауссові шуми; u_k – керування за будь-яким причинним законом. Параметричні складові η мають апріорний розподіл $\mathcal{N}(0, \Lambda^{-1})$, складові вітру – неінформативний. Монітор має доступ до запису $I_k = (y_{0:k}, u_{0:k-1})$.

Через усталений фільтр Калмана монітора кожен адитивний вплив породжує детерміновану сигнатуру нев'язки Φ_j на j-му кроці після появи [9]; S – коваріація нев'язки. Інформаційна матриця вікна тривалістю τ кроків має вигляд $J(\tau) = \sum_{j<\tau} \Phi_j^\top S^{-1} \Phi_j$ для стовпців, що відповідають (b, η), а відповідну квадратичну форму позначимо $q_\tau(b, \eta)$. Профільована інформація про зміщення і мінімальне виявлюване зміщення (рівень значущості 0,01, двобічний критерій, потужність 0,9) визначаються як

$$I_b(\tau) = \min_{\eta} \left\{ q_\tau(1, \eta) + \eta^\top \Lambda \eta \right\}, \quad b_{\min}(\tau) = \sqrt{14{,}9 / I_b(\tau)}, \tag{2}$$

де $14{,}9 \approx (2{,}576 + 1{,}282)^2$. Величина $b_{\min}$ не залежить від конкретного алгоритму: жоден монітор, що використовує той самий запис, не виявить меншого зміщення з тими самими ймовірностями помилок.

Теоретичні результати

Твердження 1 (зворотний зв'язок не змінює діагностовності). Для гіпотез, що різняться лише адитивними членами несправності чи завади або коваріацією шуму вимірювань, дивергенція Кульбака – Лейблера повного запису (і будь-якого вікна за умови попереднього запису) однакова для всіх причинних законів керування і дорівнює її значенню в розімкненому контурі.

Доведення ґрунтується на тому, що керування є відомою функцією запису і входить в обидві гіпотези однаково. Наслідок: відмінності між розімкненим і замкненим контуром, отримані для показників на ковзному вікні без урахування попереднього запису [6], є властивостями відкинутих даних. Зворотний зв'язок впливає на наслідки несправності (втрату керованості), а не на її діагностовність.

Твердження 2 (два режими). Для сходинкової форми $I_b(\tau)/\tau \to r_\infty = \|(I - \Pi) S^{-1/2} \Phi_{\infty,b}\|^2$, де Π – проектор на усталені сигнатури завад, а $\Phi_{\infty,b}$ – усталена сигнатура зміщення. Якщо усталена сигнатура зміщення не належить лінійній оболонці усталених сигнатур завад, діагностовність обмежена швидкістю ($b_{\min} \sim \tau^{-1/2}$); інакше вона обмежена порогом ($b_{\min} \to b_{floor} > 0$), який визначається перехідним процесом після появи і апріорними розподілами.

Твердження 3 (замкнений вираз порога). Нехай множина точного маскування $\mathcal{B} = \{\beta: \Phi_{\eta,j}\beta = -\Phi_{b,j}$ для всіх $j\}$ непорожня і всі завади, що маскують зміщення в усталеному режимі, належать $\mathcal{B}$. Тоді $I_b(\tau)$ монотонно зростає до

$$I^* = \min_{\beta \in \mathcal{B}} \beta_P^\top \Lambda \beta_P, \quad b_{\text{floor}} = \sqrt{14{,}9 / I^*}, \tag{3}$$

де β_P – параметрична частина β. Мінімізатор $-\beta^*$ є еквівалентним збуренням – найдешевшою за апріорним розподілом комбінацією змін середовища і об'єкта, що відтворює зміщення. Межа дорівнює нулю тоді й лише тоді, коли зміщення відтворюється завадами без апріорного обмеження; масштабування всіх апріорних середньоквадратичних відхилень у c разів змінює межу в c разів.

Твердження 4 (невидимий зсув рівноваги). За будь-якого зворотного зв'язку зміщення не відрізняється від сходинки завади β на всьому записі тоді й лише тоді, коли

$$G_\eta \beta = -f, \quad CA^i N_x \beta = 0 \text{ для всіх } i \geq 0, \tag{4}$$

тобто завада змінює показ несправного сенсора рівно на величину зміщення через безпосереднє проходження і не створює результуючої сили (для спостережуваного об'єкта – $N_x\beta = 0$). Якщо жодна завада не проходить безпосередньо на несправний сенсор, то вже на першому кроці $I_b(1) \geq f^\top S^{-1/2}(I - \Pi_G)S^{-1/2} f > 0$ незалежно від апріорних розподілів. Твердження є конкретизацією умов ідеального розв'язання [8] для сталих величин завад; новим є фізичне тлумачення і класифікація пар «об'єкт – сенсор» за двома тестами: усталеного рангу (поріг чи швидкість) і безпосереднього проходження (інформативна чи неінформативна поява).

Твердження 5 (статична похибка моделі еквівалентна погоді). У прямолінійному горизонтальному польоті з утримуваними швидкістю і висотою статична похибка аеродинамічних похідних (нахил кривої підйомної сили, поздовжня статична стійкість, ефективність керма висоти) змінює балансувальний режим точно так, як усталена комбінація вітру, маси, опору і тяги, але не так, як лише вітер. Тому монітор, що оцінює масу, опір і тягу, поглинає статичну похибку моделі, а монітор, що довіряє моделі, сприймає її як зміщення сенсора; його ефективна роздільна здатність

$$b_{\text{eff}}(\varepsilon) \approx 3{,}86\sqrt{\sigma_0^2 + \varepsilon^2 \sum_d g_d^2}, \tag{5}$$

де ε – відносна похибка похідних, σ_0 – середньоквадратичне відхилення оцінки зміщення за точної моделі, g_d – уявне зміщення на одиницю відносної похибки похідної d.

Невідомий момент виникнення. За відомого моменту появи ймовірність діагностувати зміщення протягом епізоду тривалістю D дорівнює $\Phi((d^2/2 - h)/d)$, $d^2 = b^2 I_b(D)$, де h – поріг. За невідомого моменту використано віконний тест узагальненого відношення правдоподібності, що порівнює гіпотези «зміщення (разом із завадою) в момент k_0» і «лише завада в момент k_0'» (статистика за [9]); поріг h_U, потрібний для заданої частоти хибних тривог, збільшує мінімальне виявлюване зміщення в $\kappa_U = \sqrt{\lambda(h_U)/14{,}9}$ раза. У режимі, обмеженому швидкістю, це коштує затримки (порядку логарифма середнього часу до хибної тривоги, поділеного на швидкість накопичення інформації [11]); у режимі, обмеженому порогом, це коштує роздільної здатності.

Обчислювальний експеримент

Розглянуто поздовжній рух БпЛА Aerosonde [12] у прямолінійному горизонтальному польоті на висоті 100 м зі швидкістю 20–27 м/с; турбулентність Драйдена з інтенсивністю 15, 30 і 45 вузлів [13]. Набір сенсорів S0 (частота 20 Гц): приймач повітряного тиску (0,3 м/с), путьова і вертикальна швидкості від навігаційного приймача (по 0,2 м/с), висота (1,0 м), кутова швидкість тангажу (0,2 град/с), кут тангажу від курсовертикалі (0,5 град); набір S1 додатково містить акселерометри (0,05 м/с²). Апріорні середньоквадратичні відхилення: вертикальний вітер 0,5 м/с, маса 3 %, паразитний опір 15 %, коефіцієнт тяги 5 %; горизонтальний вітер – без апріорного обмеження. Монітор – розширений фільтр Калмана зі сталими коефіцієнтами і тест узагальненого відношення правдоподібності. Теоретичні оцінки перевірено статистичним моделюванням на нелінійній моделі-двійнику.

Результати

Два режими. Мінімальне виявлюване зміщення приймача на швидкості 20 м/с наведено в табл. 1 і на рис. 1, *а*. Якщо змінюється лише вітер, діагностовність обмежена швидкістю: $b_{\min}$ зменшується від 0,50 м/с за 1 с до 0,015 м/с за 300 с. Якщо разом із вітром можуть змінюватися маса, опір і тяга з указаними апріорними відхиленнями, $b_{\min}$ прямує до межі 0,899 м/с; без апріорного обмеження цих параметрів зміщення взагалі не діагностується. Плавна поява зміщення (лінійне наростання 0,03 м/с² замість сходинки) збільшує $b_{\min}$ за 10 с з 0,086 до 0,52 м/с, оскільки інформацію несе саме перехідний процес після появи. Статистичне моделювання на нелінійному двійнику відтворює оцінки Фішера з похибкою до 5 %.

Таблиця 1

Мінімальне виявлюване зміщення приймача повітряного тиску, м/с (20 м/с, турбулентність 30 вузлів, набір S0)

Невідомі зміни	1 с	2 с	5 с	10 с	30 с	120 с	300 с
лише вітер	0,502	0,253	0,130	0,086	0,048	0,024	0,015
вітер + маса, опір, тяга (апріорні відхилення)	1,113	0,956	0,911	0,904	0,900	0,899	0,899
вітер + маса, опір, тяга (без обмежень)	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞

Еквівалентне збурення. Завищення показу приймача на 1 м/с на швидкості 20 м/с точно відтворюється комбінацією зустрічного вітру 1 м/с, збільшення маси на 9,8 %, зменшення паразитного опору на 39 % і збільшення тяги на 5,3 %: така комбінація змінює показ приймача через безпосереднє проходження і не створює результуючої сили (умова (4) виконується з рангом 4 для 5 невідомих). Тому акселерометри не усувають межу: з набором S1 $b_{\min}$ за 1 с становить 0,938 м/с. Межа становить 0,899; 0,993; 1,133 і 1,226 м/с на швидкостях 20, 22, 25 і 27 м/с і визначається переважно апріорною невизначеністю маси: $b_{floor} \approx 1{,}5V\sigma_m$, де V – швидкість, σ_m – відносне апріорне відхилення маси. Практично значуща межа потребує невизначеності маси разом з опором або тягою: для

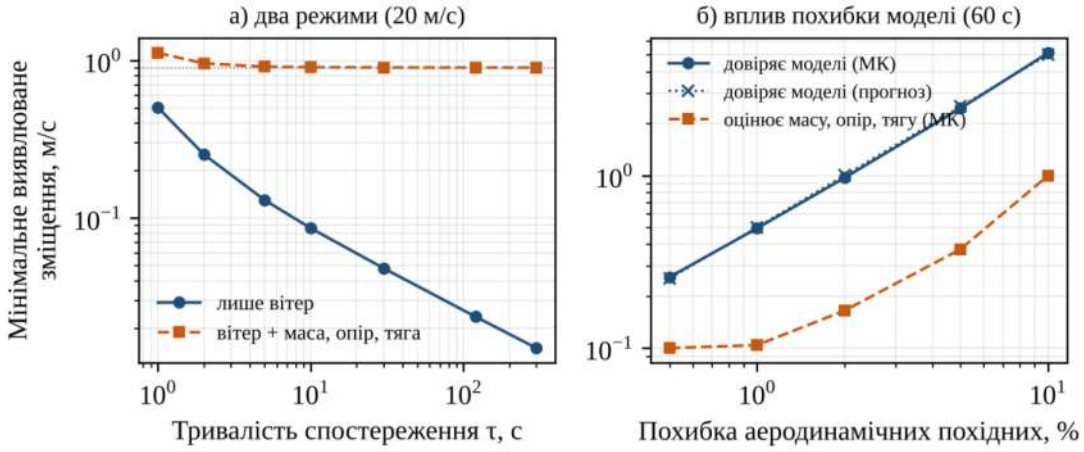


Рис. 1. Межі діагностовності зміщення приймача повітряного тиску: а – мінімальне виявлюване зміщення залежно від тривалості спостереження за двох класів невідомих змін; б – ефективна роздільна здатність двох моніторів залежно від статичної похибки аеродинамічних похідних (МК – статистичне моделювання на нелінійному двійнику)

пар {маса, опір} і {маса, тяга} межа становить 0,869 і 0,487 м/с. Опір і тяга без маси також точно маскують зміщення, але лише за 17-кратної зміни опору, тому практично цей випадок обмежений швидкістю (межа 0,013 м/с). Попередньо сформульована гіпотеза про достатність будь-якої пари параметрів не підтвердилася і була уточнена саме в такий спосіб.

Другий об'єкт. Для двох послідовно з'єднаних резервуарів жодна завада не може змінити показ датчика рівня стрибком, тому поява несправності інформативна (твердження 4), і межа скінченна (0,149 см) навіть за необмежених завад; статистичне моделювання на моделі об'єкта узгоджується з оцінкою Фішера. Отже, два структурні тести розрізняють об'єкти, для яких поріг визначається апріорною невизначеністю, і об'єкти, для яких він визначається самою появою несправності.

Зворотний зв'язок. Для двох регуляторів різниця потужності виявлення не перевищує 0,008, що підтверджує твердження 1; водночас втрата керованості за зміщення 3 м/с становить 112 і 10 випадків на 2000 прогонів, тобто регулятор визначає наслідки несправності, а не її діагностовність.

Похибка моделі. Ефективну роздільну здатність двох моніторів за 60 с наведено в табл. 2 і на рис. 1, б. Статична похибка похідних відтворюється еквівалентною комбінацією вітру, маси, опору і тяги з відносним залишком не більше $9{,}3 \cdot 10^{-6}$, але не лише вітром (залишок 1,7–8,2). Монітор, що довіряє моделі, втрачає близько 0,5 м/с роздільної здатності на кожен відсоток похибки, відповідно до (5) з $\sum_d g_d^2 \approx 13^2$; для режиму, обмеженого швидкістю (0,03 м/с за 60 с), потрібна статична точність моделі близько 0,1 %. Монітор, що оцінює масу, опір і тягу, зберігає роздільну здатність 0,10–0,17 м/с за похибки 0,5–2 % і 0,37–1,0 м/с за похибки 5–10 %. Для цього монітора статична оцінка (0,146 м/с) є лише нижньою межею: динамічна невідповідність моделі додає 0,37 і 1,0 м/с за похибки 5 і 10 %, тобто відповідна попередньо сформульована гіпотеза для нього не підтвердилася.

Таблиця 2

Ефективна роздільна здатність моніторів за 60 с, м/с (20 м/с)

Відносна похибка похідних	0 %	0,5 %	1 %	2 %	5 %	10 %
монітор довіряє моделі: моделювання	0,031	0,258	0,495	0,971	2,45	5,13
монітор довіряє моделі: прогноз (5)	–	0,253	0,502	1,003	2,51	5,01
монітор оцінює масу, опір і тягу: моделювання	0,093	0,100	0,104	0,165	0,374	0,998

Невідомий момент виникнення і місії. Невідомий момент появи збільшує мінімальне виявлюване зміщення в 1,8–2,0 раза для монітора, що враховує лише вітер, і в 1,35–1,41 раза для монітора, що враховує зміни об'єкта (за частоти хибних тривог одна на 30 двадцятихвилинних місій). У моделюванні місій епізоди зміщення 0,5 м/с виявлено в 1000 із 1000 випадків із медіанною затримкою 0,75 с за 0,033 хибної тривоги на місію; прогнозовані ймовірності виявлення епізодів справдилися в 28 із 32 комбінацій умов. Кінематична перевірка, аналогічна застосовуваній у поширених автопілотах, за тієї самої частоти хибних тривог не розрізняє зміщень, менших приблизно за 5 м/с, тобто порівнянних із фронтами поривів; монітор, що не враховує погодних змін об'єкта, видає хибну тривогу в 88–90 % місій зі зміною погоди. Деградація шумового типу (зростання шуму приймача), навпаки, діагностується не більше ніж за 1,6 с навіть за зміни інтенсивності турбулентності.

Обговорення результатів

Отримані результати мають характер меж, а не нового детектора. Головний висновок полягає в тому, що для пари «літак – приймач повітряного тиску» в прямолінійному польоті діагностовність малих зміщень обмежена не шумом і не тривалістю спостереження, а апріорним знанням параметрів літака: зміщення показу на 1 м/с фізично еквівалентне такій зміні вітру, маси, опору і тяги, яка не створює результуючої сили і тому не помітна ні для навігаційної системи, ні для акселерометрів. Межа близько 1 м/с на швидкості 20 м/с пропорційна апріорній невизначеності маси і зменшується лише за кращого знання маси або за зміни режиму польоту, яка порушує еквівалентність (еквівалентне збурення залежить від швидкості, а зміна курсу кінематично відокремлює вітер). Звідси випливає обґрунтування для активної діагностики та керування збором інформації.

Другий практичний висновок стосується похибки моделі. Статична похибка аеродинамічної моделі діє на монітор як усталена зміна погоди, тому монітор, що довіряє моделі, потребує точності, недосяжної на практиці, а монітор, який вважає параметри об'єкта невизначеними, досягає межі і не дає хибних тривог через зміну погоди. Невідомий момент виникнення в режимі, обмеженому порогом, коштує роздільної здатності, а не лише затримки.

Обмеження роботи: один тип літального апарата (і модельний другий об'єкт); прямолінійний політ в одному балансувальному режимі; гауссові апріорні розподіли для сходинкових змін; лінійні сигнатури (узгодження з нелінійним двійником у межах 5 % для зміщень до 2,5 м/с); монітори зі сталими коефіцієнтами; динамічна невідповідність моделі врахована лише емпірично; льотні дані не використано.

Висновки

1. Для лінійно-гауссової моделі замкненої системи введено профільовану інформацію Фішера і мінімальне виявлюване зміщення сенсора за одночасних змін середовища і параметрів об'єкта з апріорною невизначеністю; доведено, що зворотний зв'язок не змінює діагностовності адитивних несправностей.

2. Встановлено два режими діагностовності – обмежений швидкістю і обмежений порогом – та отримано замкнений вираз порога як апріорної вартості найдешевшого еквівалентного збурення; сформульовано структурну умову невидимого зсуву рівноваги, за якої поява несправності не несе інформації, і класифікацію об'єктів за двома тестами.

3. Для БпЛА Aerosonde межа роздільної здатності зміщення приймача повітряного тиску становить 0,90–1,23 м/с на швидкостях 20–27 м/с, пропорційна апріорній невизначеності маси і не усувається акселерометрами; для об'єкта з інформативною появою несправності межа скінченна навіть за необмежених завад.

4. Статична похибка аеродинамічної моделі еквівалентна усталеній зміні погоди: монітор, що довіряє моделі, втрачає близько 0,5 м/с роздільної здатності на 1 % похибки похідних, а монітор, що оцінює масу, опір і тягу, зберігає роздільну здатність 0,1–1,0 м/с за похибки 0,5–10 %. Невідомий момент виникнення збільшує поріг виявлення в 1,35–2,0 раза, а кінематична перевірка автопілота не розрізняє зміщень, менших приблизно за 5 м/с.

Напрями подальших досліджень

Подальші дослідження доцільно спрямувати на активну діагностику, у якій маневр порушує невидимий зсув рівноваги, з урахуванням вартості маневру; на теорію динамічної невідповідності моделі; на бічний рух і криволінійний політ; на перевірку меж на льотних даних.

Список використаної літератури

1. Hansen S., Blanke M. Diagnosis of airspeed measurement faults for unmanned aerial vehicles. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2014. Vol. 50, No. 1. P. 224–239. DOI: 10.1109/TAES.2013.120420

2. Sun K., Gebre-Egziabher D. Air data fault detection and isolation for small UAS using integrity monitoring framework. *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*. 2021. Vol. 68, No. 3. P. 577–600. DOI: 10.1002/navi.440

3. Lopes L. L., Travé-Massuyès L., Jauberthie C., Alcalay G. A review of fault diagnosis techniques applied to aircraft air data sensors. *35th International Conference on Principles of Diagnosis and Resilient Systems (DX 2024)*. Wadern : Schloss Dagstuhl – Leibniz-Zentrum für Informatik, 2024. P. 3:1–3:20. (OASIcs ; vol. 125). DOI: 10.4230/OASIcs.DX.2024.3

4. Freeman P., Seiler P., Balas G. J. Air data system fault modeling and detection. *Control Engineering Practice*. 2013. Vol. 21, No. 10. P. 1290–1301.

5. Eriksson D., Frisk E., Krysander M. A method for quantitative fault diagnosability analysis of stochastic linear descriptor models. *Automatica*. 2013. Vol. 49, No. 6. P. 1591–1600.

6. Liu Q., Wang Z., Zhang J., Zhou D. Necessary and sufficient conditions for fault diagnosability of linear open- and closed-loop stochastic systems under sensor and actuator faults. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2022. Vol. 67, No. 8. P. 4178–4185. DOI: 10.1109/TAC.2021.3108587

7. Ding S. X. Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools. Berlin : Springer, 2008.

8. Willsky A. S., Jones H. L. A generalized likelihood ratio approach to the detection and estimation of jumps in linear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1976. Vol. 21, No. 1. P. 108–112.

9. Lau T. S., Tay W. P. Quickest change detection in the presence of a nuisance change. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2019. DOI: 10.1109/TSP.2019.2939080

10. Chen Y.-Z. J., Zuo J., Veeravalli V. V., Towsley D. Quickest change detection with confusing change. *arXiv*. 2024. arXiv:2405.00842

11. Lorden G. Procedures for reacting to a change in distribution. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1971. Vol. 42, No. 6. P. 1897–1908.

12. Beard R. W., McLain T. W. Small unmanned aircraft: theory and practice. Princeton : Princeton University Press, 2012.

13. MIL-F-8785C. Military specification: flying qualities of piloted airplanes. Washington : U.S. Department of Defense, 1980.

References

1. Hansen, S., & Blanke, M. (2014). Diagnosis of airspeed measurement faults for unmanned aerial vehicles. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, *50*(1), 224–239. https://doi.org/10.1109/TAES.2013.120420

2. Sun, K., & Gebre-Egziabher, D. (2021). Air data fault detection and isolation for small UAS using integrity monitoring framework. *: Journal of the Institute of Navigation*, *68*(3), 577–600. https://doi.org/10.1002/navi.440

3. Lopes, L. L., Travé-Massuyès, L., Jauberthie, C., & Alcalay, G. (2024). A review of fault diagnosis techniques applied to aircraft air data sensors. In *35th International Conference on Principles of Diagnosis and Resilient Systems (DX 2024)* (OASIcs, Vol. 125, pp. 3:1–3:20). Schloss Dagstuhl – Leibniz-Zentrum für Informatik. https://doi.org/10.4230/OASIcs.DX.2024.3

4. Freeman, P., Seiler, P., & Balas, G. J. (2013). Air data system fault modeling and detection. *Control Engineering Practice*, *21*(10), 1290–1301.

5. Eriksson, D., Frisk, E., & Krysander, M. (2013). A method for quantitative fault diagnosability analysis of stochastic linear descriptor models. *Automatica*, *49*(6), 1591–1600.

6. Liu, Q., Wang, Z., Zhang, J., & Zhou, D. (2022). Necessary and sufficient conditions for fault diagnosability of linear open- and closed-loop stochastic systems under sensor and actuator faults. *IEEE Transactions on Automatic Control*, *67*(8), 4178–4185. https://doi.org/10.1109/TAC.2021.3108587

7. Ding, S. X. (2008). *Model-based fault diagnosis techniques: Design schemes, algorithms, and tools*. Springer.

8. Willsky, A. S., & Jones, H. L. (1976). A generalized likelihood ratio approach to the detection and estimation of jumps in linear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, *21*(1), 108–112.

9. Lau, T. S., & Tay, W. P. (2019). Quickest change detection in the presence of a nuisance change. *IEEE Transactions on Signal Processing*. https://doi.org/10.1109/TSP.2019.2939080

10. Chen, Y.-Z. J., Zuo, J., Veeravalli, V. V., & Towsley, D. (2024). *Quickest change detection with confusing change* (arXiv:2405.00842). arXiv.

11. Lorden, G. (1971). Procedures for reacting to a change in distribution. *The Annals of Mathematical Statistics*, *42*(6), 1897–1908.

12. Beard, R. W., & McLain, T. W. (2012). *Small unmanned aircraft: Theory and practice*. Princeton University Press.

13. U.S. Department of Defense. (1980). *Military specification: Flying qualities of piloted airplanes* (MIL-F-8785C).

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025

ВІСНИК

Херсонського національного технічного університету

Відповідальний за випуск	головний редактор Литвиненко В. І. д.т.н., професор, завідувач кафедри інформатики і комп'ютерних наук, заслужений діяч науки і техніки України
Комп'ютерна верстка	Клименко Т. О.
Відповідальний секретар	Лур’є І. А. к.т.н., доцент, начальник навчально-методичного відділу, доцент кафедри інформатики і комп’ютерних наук

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа: Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення № 1541 від 09.05.2024 року. Ідентифікатор медіа: R30-04565.

Суб’єкт у сфері друкованих медіа – Херсонський національний технічний університет (вул. Інститутська, буд. 11, м. Хмельницький, 29016, olena.chepelyuk@kntu.net.ua, тел. +38 (0382) 77-35-65).

Періодичність виходу: 4 рази на рік.

Підписано до друку 28.11.2025.
Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman. Папір офсет. Цифровий друк.
Ум. друк. арк. 45,11. Замов. № 1125/879. Наклад 100 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб’єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.