

ISSN 2078-4481

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ВІСНИК

**ХЕРСОНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ**

4(95)

Частина 1

Рекомендовано до друку Вченою радою
Херсонського національного технічного університету
(протокол № 6 від 11.12.2025 року)

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України
категорії «Б» зі спеціальностей: C1, 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

Шерстюк В. Г.

д.т.н., професор, проректор з навчальної роботи

Заступник головного редактора

Сарібекова Ю. Г.

д.т.н., професор

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**

4(95)

Part 1

Recommended for publication by the Academic Council
of Kherson National Technical University
(Minutes № 6 on 11th December 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

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

Deputy Editor-in-Chief

Saribekova Yu. G.
Doctor of Engineering Science, Professor

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
Sidelnikova 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

Н. І. Александровська, Л. В. Пізінцалі, О. І. Россомаха, О. А. Россомаха, Т. В. Рабоча. Гонконгська конвенція: утилізація суден в Україні та в сучасному світі.....	9
О. В. Андропова, В. В. Курак. Моделювання непокритого фотоелектричного теплового колектора в MATLAB/Simulink.....	23
В. О. Бахмач, Т. Т. Носенко, О. С. Клименко. Дослідження властивостей та оптимізація ефективності піноутворюючих мийних засобів Кліноллі для очищення відкритих поверхонь.....	30
С. В. Бігун. Підвищення ефективності системи змащення циліндро-поршневої групи судових двигунів при використанні мастил з низьким вмістом лужності	36
І. С. Білюк, А. В. Рачинський, А. М. Фоменко. Дослідження принципів роботи автономної хвильової електростанції для забезпечення енергією прибережних територій.....	43
О. М. Близнюк, А. А. Воронкін, В. В. Волощук, М. Д. Мірошниченко, В. В. Лебедєв. Тенденції розвитку технологій 3D-біопринтингу з використанням біологічно-активних гідрогелів	51
Ю. І. Бляшинець. Оцінювання стійкості лісовозного автомобіля за допомогою портативного вимірювального пристрою.....	57
В. С. Волошин. Термодинамічні особливості відходуотворення в хімічних та пов'язаних з ними технологіях.....	63
С. В. Гайдукевич, Н. П. Семенова. Інтелектуальна система контролю, керування та захисту електродвигуна приводу екструдера.....	71
Ю. М. Голобородько. Радіомоніторинг декаметрового діапазону.....	79
Я. С. Григоренко, М. Ф. Кузмичов, Д. О. Дмитрієв. Інтелектуальні технології визначення характеристик якості металевих виробів в процесах пошарового утворення.....	84
А. Г. Данилкович, О. А. Охмат, Г. М. Михайлова. Підвищення однорідності еластичної шкіри з кінської сировини.....	92
Д. О. Дмитрієв, А. М. Кириченко, М. Ф. Кузмичов. Технічні і технологічні рішення в компонетиці обладнання 3D-друку металевими сплавами.....	99
Н. Л. Дон, І. Ф. Погребняк, О. О. Корнієнко. Розрахунок струмів короткого замикання в системі електропостачання цеху промислового підприємства з використанням моделювання в MATLAB Simulink	106
В. М. Дубік, А. П. Березовський, Е. В. Прокопенко. Розробка біосенсорних систем для ранньої діагностики хронічних захворювань в Україні.....	112
О. В. Єриганов. Автоматизовані системи діагностики судових двигунів у реальному часі	121
В. О. Зозуля, С. М. Усенко. Використання цифрових систем моніторингу для підвищення енергоефективності індукційного нагріву.....	127
А. В. Іванченко, В. В. Воронов, Ю. О. Середа. Адсорбційне вилучення фосфору з рідких відходів з утилізацією осадів у добрива	136
О. В. Іщенко, Г. І. Кузьміна, О. М. Роїк, Ю. В. Куніцька, О. В. Петренко. Розробка технології ліпідної маски для відновлення пошкодженого волосся.....	144
О. В. Канівець, О. І. Біловод, Д. С. Тарасенко. Підвищення ефективності та якості роботи транспортних систем механоскладальних дільниць.....	158
А. В. Касьян, О. С. Галецький. Розробка стенду для випробовування енергоефективного пневматичного позиційного приводу.....	164
С. Г. Катріч, Д. О. Дмитрієв. Особливості застосування технології 3д друку для виготовлення деталей у машинобудуванні та робототехніці.....	172
В. І. Кирица. Вплив конструктивних і технологічних особливостей суден на організацію машинної вахти	180
О. В. Ключев, О. О. Ящук. Умови самозбудження конденсаторних асинхронних генераторів.....	186
В. М. Колодненко, О. В. Клещ, Д. В. Клименко. Комплексна класифікація вантажів як основа ефективної організації транспортних перевезень.....	193
С. О. Копилов. Одержання та дослідження деревино-полімерних композитів з одночасною модифікацією полімерної матриці та деревинного наповнювача.....	200

В. І. Кравченко. Випробування водогрійного котельного агрегату в режимі спалювання композитних біопаливних пелет, виготовлених на основі осадів стічних вод.....	210
Н. І. Кравчук, V. V. Kurak. Analysis of energy indicators of silicon and concentrator heterostructure photoelectric modules in climatic conditions of the middle zone of Ukraine.....	216
Ю. О. Лебеденко, І. І. Кривошеєнко, Н. В. Бунда. Автоматизація ресурсних випробувань побутової техніки на основі роботизованого комплексу з системою технічного зору	223
Є. М. Лебідь, І. Г. Лебідь, О. О. Мазуренко, Н. О. Лужанська. Оптимізація діяльності складського підприємства при наданні послуг замовникам.....	230
О. Л. Матвєєва, А. Д. Кустовська, І. Л. Трофімов, В. В. Єфименко, М. Р. Максимюк. Сучасні науково-технічні підходи до забезпечення чистоти виробничих приміщень у фармацевтичній промисловості.....	237
О. О. Мельник, Ю. Ю. Варивода, А. А. Субін. Розробка цифрових двійників для прогнозування технічного зносу виробничого обладнання.....	246
А. М. Некрилов. Використання нахильно-зсувної фурнітури при заскленні житлових будівель.....	254
Ф. О. Птащенко, О. Ю. Поповський, А. А. Горюк, В. П. Зенченко, В. М. Полосіна, О. І. Велика. Моделювання та оптимізація резонансних умов для систем бездротової передачі енергії в УВЧ-діапазоні.....	266
А. В. Ремінь, П. О. Семенов. Дослідження технічного стану підшипників приводу механізму підйому причального контейнерного перевантажувача.....	273
І. М. Рибалко, А. В. Захаров, О. В. Тіхонов. Підвищення експлуатаційної стійкості робочих органів ґрунтообробної техніки електрошлаковим наплавленням з комплексним модифікуванням покриттів.....	279
С. А. Русанов, О. І. Ключев, Д. О. Дмитрієв, І. А. Шатохіна. Комп'ютерне моделювання гідродинаміки та нерівномірності розігріву головки та блоку циліндрів при передпусковій тепловій підготовці автомобільних двигунів.....	289
С. Л. Семірненко, Ю. І. Семірненко. Брикетування бадилля картоплі як спосіб ефективного використання рослинної біомаси.....	297
Ю. І. Семірненко, С. Л. Семірненко. Оптимізація транспортно-технологічного обслуговування зернозбиральних комбайнів у малих агропідприємствах.....	305
Т. В. Серденко, О. В. Максютіна, Р. В. Росул, Л. А. Проц. Особливості проектування та експлуатації ліній електропередач у Закарпатській області.....	312
М. І. Солод. Дослідження забруднень води внаслідок військово-антропогенних впливів.....	318
О. В. Степанов, Т. В. Волобуєва, І. Ю. Кобзар. Правові аспекти пасажирських автоперевезень.....	324
О. В. Степанов, Т. В. Волобуєва, Т. О. Козаченко. Оптимізація автотранспортних вантажних перевезень в умовах воєнного стану в Україні: моделювання маршрутів та використання цифрових платформ.....	331
О. В. Таценко, О. О. Соларьов, О. Ю. Савойський. Дослідження взаємозв'язків між ергономічним станом робочого місця і ефективністю транспортного процесу перевезення вантажів.....	338
Д. Б. Шахнін, І. М. Волошина, Л. А. Майстренко, І. О. Грецький. Біоінжиніринг рекомбінантних білків... 346	
Д. В. Янюк. Інтегральна оцінка впливу скорочення операції формування торця на показники ефективності токарної обробки пруткових заготовок.....	352

ТЕХНОЛОГІЯ ЛЕГКОЇ ТА ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Л. Є. Галавська, Ю. М. Харченко, С. І. Арабулі, А. Т. Арабулі. Дослідження впливу технологічних факторів на гігієнічні властивості трикотажного матеріалу чохла для культі.....	359
Ю. Ю. Лук'яненко, В. М. Безпальченко, О. Я. Семешко. Оцінка якості безалкогольних солодких газованих напоїв «лимонад» ринку України.....	372
М. Є. Рацук, Т. А. Юрова, О. Б. Конофольська, К. С. Рацук. Застосування екстрактів лікарських рослин для одержання шампуню для волосся	380

CONTENTS

ENGINEERING SCIENCES

N. I. Aleksandrovska, L. V. Pizintsali, O. I. Rossomakha, O. A. Rossomakha, T. V. Rabocha. Hong Kong convention: ship recycling in ukraine and the modern world.....	9
O. V. Andronova, V. V. Kurak. Simulation of uncovered photovoltaic thermal collector in MATLAB/Simulink.....	23
V. O. Bakhmach, T. T. Nosenko, O. S. Klymenko. Investigation of properties and optimization of performance of Klinoll foaming cleaning agents for open surfaces.....	30
S. V. Bihun. Improving the efficiency of the cylinder-piston group lubrication system of marine engines when using oils with low alkalinity content.....	36
I. S. Biliuk, A. V. Rachynskyi, A. M. Fomenko. Exploring the advantages and limitations of the feature-sliced design architectural methodology in commercial frontend projects.....	43
O. M. Bliznyuk, A. A. Voronkin, V. V. Voloshchuk, M. D. Miroshnychenko, V. V. Lebedev. Trends in the development of 3D bioprinting technologies using biologically active hydrogels.....	51
Yu. I. Bliashynets. Evaluation of logging truck stability using a portable measuring device.....	57
V. S. Voloshyn. Thermodynamic peculiarity of wast generation in chemical and related technologies.....	63
S. V. Haidukevych, N. P. Semenova. Intelligent system for control, management and protection of the extruder drive motor.....	71
Yu. M. Holoborodko. Decameter band radio monitoring.....	79
Ya. S. Hryhorenko, M. F. Kuzmichov, D. O. Dmytriiev. Intelligent technologies for determining quality characteristics of metal products in layer-by-layer formation processes.....	84
A. H. Danylkovych, O. A. Okhmat, H. M. Mykhailova. Enhancing the uniformity of elastic leather from equine hides.....	92
D. O. Dmytriiev, A. M. Kyrychenko, M. F. Kuzmichov. Technical and technological solutions in the component design of metal alloy 3D-printing equipment.....	99
N. L. Don, I. F. Pogrebniak, O. O. Korniienko. Calculation of short-circuit currents in the power supply system of an industrial enterprise workshop using MATLAB Simulink modeling.....	106
V. M. Dubik, A. P. Berezovskyi, E. V. Prokopenko. Development of biosensor systems for early diagnosis of chronic diseases in Ukraine.....	112
O. V. Yeryganov. Automated real-time marine engine diagnostics systems	121
V. O. Zozulia, S. M. Usenko. Using digital monitoring systems to improve energy efficiency of induction heating.....	127
A. V. Ivanchenko, V. V. Voronov, Yu. O. Sereda. Adsorption extraction of phosphorus from liquid waste with utilization of sediments in fertilizer.....	136
O. V. Ishchenko, G. I. Kuzmina, O. M. Roik, Yu. V. Kunitska, O. V. Petrenko. Development of a lipid mask technology for restoring damaged hair.....	144
O. V. Kanivets, O. I. Bolovod, D. S. Tarasenko. Improving the efficiency and quality of transport systems in mechanical assembly departments.....	158
A. V. Kasian, O. S. Haletskii. Design of a test bench for experimenting with an energy-efficient pneumatic positioning actuator.....	164
S. G. Katrich, D. O. Dmytriiev. The specifics of applying 3D printing technology for manufacturing components in mechanical engineering and robotics.....	172
V. I. Kyrnats. The influence of structural and technological features of ships on the organization of the engine watch	180
O. V. Kliuiev, O. O. Yashchuk. Self-excitation conditions of capacitor induction generators.....	186
V. M. Kolodnenko, O. V. Klieshch, D. V. Klymenko. Comprehensive classification of cargoes as a basis for effective organization of transport operations.....	193
S. O. Kopylov. Preparation and research of wood-polymer composites with simultaneous modification of the polymer matrix and wood filler.....	200
V. I. Kravchenko. Testing of a water heating boiler unit in the combustion mode of composite biofuel pellets made on the basis of sewage sludge.....	210

H. I. Krapyvko, V. V. Kurak. Analysis of energy indicators of silicon and concentrator heterostructure photoelectric modules in climatic conditions of the middle zone of Ukraine.....	216
Yu. O. Lebedenko, I. I. Kryvosheienko, N. V. Bunda. Automation of resource testing of household appliances based on a robotic complex with a machine vision system.....	223
Ie. M. Lebid, I. G. Lebid, O. O. Mazurenko, N. O. Luzhanska. Optimization of warehouse enterprise operations in providing services to customers.....	230
O. L. Matvyeyeva, A. D. Kustovska, I. L. Trofimov, V. V. Yefymenko, M. R. Maksymyuk. Modern scientific and technical approaches to providing cleanliness of production premises in the pharmaceutical industry.....	237
O. O. Melnyk, Yu. Yu. Varyvoda, A. A. Subin. Development of digital twins for predicting technical wear of production equipment.....	246
A. M. Nekrylov. Use of tilt-and-slide fittings in the glazing of residential buildings.....	254
F. O. Ptashchenko, O. Yu. Popovskii, A. A. Goryuk, V. P. Zenchenko, V. M. Polosina, O. I. Velyka. Modeling and optimization of resonance conditions for UHF wireless power transmission systems.....	266
A. V. Remin, P. O. Semenov. Research on the technical condition of the drive bearings of the quay container handler lifting mechanism.....	273
I. M. Rybalko, A. V. Zakharov, O. V. Tihonov. Increasing the operational stability of working parts of soil cultivation equipment by electroslack surface coating with complex modification of the coating coverings....	279
S. A. Rusanov, O. I. Kliuiev, D. O. Dmytriiev, I. A. Shatokhina. Computer simulation of hydrodynamics and heating non-uniformity of the cylinder head and block during pre-start thermal conditioning of automotive engines.....	289
S. L. Semirnenko, Y. I. Semirnenko. Briquetting of potato haulm as a method of effective use of plant biomass....	297
Yu. I. Semirnenko, S. L. Semirnenko. Optimization of transport and technological servicing of grain harvesters in small agricultural enterprises.....	305
T. V. Serdenko, O. V. Maksyutova, R.v. Rosul, L. A. Prots. Design and operational aspects of power transmission lines in the Zakarpattia region.....	312
M. I. Solod. The reasearch on water pollution due to military-anthropogenic influences.....	318
O. V. Stepanov, T. V. Volobueva, I. Yu. Kobzar. Legal aspects of passenger road transport.....	324
O. V. Stepanov, T. V. Volobueva, T. O. Kozachenko. Optimization of motor transport freight transportation under martial law in Ukraine: route modeling and use of digital platforms.....	331
O. V. Tatsenko, O. O. Solarov, O. Yu. Savoiskyi. Research on the relationship between the ergonomic condition workplace and the efficiency of the cargo transportation process.....	338
D. B. Shakhnin, I. M. Voloshyna, L. A. Maistrenko, I. O. Hretskyi. Bioengineering of recombinant proteins.....	346
D. V. Yanyuk. Integral assessment of the impact of reducing the end forming operation on the efficiency indicators of turning processing of bar blanks.....	352

THE TECHNOLOGY OF LIGHT AND FOOD INDUSTRY

L. Ye. Halavska, Yu. M. Kharchenko, S. I. Arabuli, A. T. Arabuli. Research on the influence of technological factors on the hygienic properties of a knitted material cover for stumps.....	359
Yu. Yu. Lukyanchenko, V. M. Bezpalchenko, O. Ya. Semeshko. Quality assessment of non-alcoholic sweet carbonated beverages «lemonade» on the Ukrainian market.....	372
M. Ye. Ratsuk, T. A. Yurova, O. B. Konofolska, K. S. Ratsuk. Application of medical plant extracts for hair shampoo production.....	380

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 629.5:341.01:351.823

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.4.1.1>

Н. І. АЛЕКСАНДРОВСЬКА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри суднобудування і судноремонту
імені професора Ю. Л. Воробйова,
доцент кафедри судових енергетичних систем і комплексів
Навчально-науковий морський інженерно-технічний інститут
Одеського національного морського університету
ORCID: 0000-0001-6591-2068

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

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

О. А. РОССОМАХА

доцент, начальник навчально-методичного відділу,
доцент кафедри судових енергетичних систем і комплексів
Навчально-науковий інститут морського флоту
Одеського національного морського університету
ORCID: 0000-0002-0230-9453

Т. В. РАБОЧА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри забезпечення військ (сил)
Навчально-науковий інститут логістичного забезпечення
Військової академії (м. Одеса)
ORCID: 0000-0002-9475-334X

ГОНКОНГСЬКА КОНВЕНЦІЯ: УТИЛІЗАЦІЯ СУДЕН В УКРАЇНІ ТА В СУЧАСНОМУ СВІТІ

Стаття присвячена екологічно безпечній утилізації морських і річкових суден у контексті «зеленої» та цифрової трансформації економіки України. Комплексно проаналізовано міжнародні нормативні підходи до регулювання переробки суден, зокрема положення Гонконзької міжнародної конвенції, Регламенту ЄС щодо рециклінгу суден (EU SRR), стандартів ISO 14001 та ISO 30000, які формують вимоги до екологічного менеджменту, безпеки працівників і контролю небезпечних матеріалів. Показано взаємозв'язок глобальних екологічних тенденцій, розвитку циркулярної економіки та необхідності модернізації національної політики України у сфері утилізації морського флоту.

Проведено огляд сучасних технологій демонтажу суден, включаючи гідроабразивне, механічне, термічне та комбіновані методи різання, з оцінкою їх екологічних, енергетичних та економічних показників. Узагальнено міжнародний досвід, зокрема практики суднопереробних підприємств Туреччини, які демонструють ефективне поєднання

© Н. І. Александровська, Л. В. Пізінцалі, О. І. Россомаха, О. А. Россомаха, Т. В. Рабоча, 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

промислової інфраструктури та суворих стандартів охорони довкілля. На основі аналізу стану українського флоту визначено критичні проблеми: високий середній вік суден, відсутність централізованого обліку списання, брак технічних засобів і кваліфікованих кадрів, а також суттєві бюрократичні й корупційні ризики в дозвільних процедурах.

Наведено статистичні дані про світовий суднолом за 2020–2024 рр., що свідчать про нерівномірність динаміки обсягів утилізації та високий вплив фрахтового ринку, вартості сталі та впровадження нових екологічних вимог на структуру списання. Підкреслено, що для України розвиток галузі утилізації може стати важливим інструментом відродження суднобудівних і судноремонтних підприємств, формування ринку вторинних матеріалів та зниження екологічних ризиків.

Запропоновано комплексний підхід до створення національної системи «зеленої» утилізації суден, що включає ратифікацію міжнародних документів, оновлення нормативної бази, розвиток технічних потужностей, формування стандартів екологічного менеджменту та запровадження прозорих механізмів контролю. Показано, що реалізація таких заходів сприятиме підвищенню рівня екологічної безпеки, інтеграції України в європейські практики циркулярної економіки та зміцненню морської галузі в цілому.

Ключові слова: стратегії ІМО, шкідливі викиди, енергоефективність, внутрішнє плавання, паливна ефективність, 3-D друкування.

N. I. ALEKSANDROVSKA

PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Shipbuilding and Ship Repair
named after Professor 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

L. V. PIZINTSALI

Ph.D., Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Shipbuilding and Ship Repair
named after Professor Yu. L. Vorobyov
Educational and Scientific Marine Engineering and Technical Institute
of Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0002-8046-0917

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 Professor Yu. L. Vorobyov
Merchant Marine Institute
of Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0002-4425-2192

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

T. V. RABOCHA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Provision of Troops (Forces)
Educational and Scientific Institute of Logistics Support
of Odesa Military Academy
ORCID: 0000-0002-9475-334X

HONG KONG CONVENTION: SHIP RECYCLING IN UKRAINE AND THE MODERN WORLD

The article is devoted to the environmentally safe disposal of sea and river vessels in the context of the “green” and digital transformation of Ukraine's economy. It provides a comprehensive analysis of international regulatory approaches to ship recycling, in particular the provisions of the Hong Kong International Convention, the EU Ship

Recycling Regulation (EU SRR), and ISO 14001 and ISO 30000 standards, which set requirements for environmental management, worker safety, and hazardous materials control. The interconnection between global environmental trends, the development of the circular economy, and the need to modernize Ukraine's national policy in the field of maritime fleet disposal is demonstrated.

An overview of modern ship dismantling technologies is provided, including hydroabrasive, mechanical, thermal, and combined cutting methods, with an assessment of their environmental, energy, and economic performance. International experience is summarized, in particular the practices of ship recycling companies in Turkey, which demonstrate an effective combination of industrial infrastructure and strict environmental standards. Based on an analysis of the state of the Ukrainian fleet, critical problems have been identified: the high average age of ships, the lack of centralized accounting for decommissioning, the lack of technical resources and qualified personnel, as well as significant bureaucratic and corruption risks in licensing procedures.

Statistical data on global shipbreaking for 2020–2024 are presented, showing uneven dynamics in recycling volumes and the significant impact of the freight market, steel prices, and the introduction of new environmental requirements on the structure of decommissioning. It is emphasized that for Ukraine, the development of the recycling industry could become an important tool for the revival of shipbuilding and ship repair enterprises, the formation of a secondary materials market, and the reduction of environmental risks.

A comprehensive approach to the creation of a national system of “green” ship recycling is proposed, which includes the ratification of international documents, updating the regulatory framework, developing technical capacities, forming environmental management standards, and introducing transparent control mechanisms. It is shown that the implementation of such measures will contribute to improving environmental safety, integrating Ukraine into European circular economy practices, and strengthening the maritime industry as a whole.

Key words: IMO strategies, harmful emissions, energy efficiency, domestic shipping, fuel efficiency, 3-D printing.

Постановка проблеми

Трансформація сфер економіки – це особлива риса сьогодення. Основою розвитку сьогодні стають адитивні технології, роботизація, технології доповненої реальності, штучний інтелект, а глобальні екологічні проблеми потребують комплексу новітніх підходів та змін на шляху їх вирішення. Отже, формування ефективних механізмів «зеленої» та цифрової трансформації економіки України стають найбільш актуальними та затребуваними. Обрання «зеленого» та цифрового курсу дозволить сформувати підґрунтя прогресивного руху економіки України в післявоєнний період у відповідності до загальноєвропейський та світових трендів.

Відповідно до визначення, яке подається у Програмі Організації Об'єднаних Націй з навколишнього середовища (НС) (ЮНЕП), «зелена» економіка – це економіка, що орієнтується на покращення добробуту людства та соціальну рівність, шляхом істотного скорочення ризиків від змін НС і нестачі природних екологічних ресурсів [1].

Екологічні проблеми, особливо в індустрії переробки суден, стають дедалі очевиднішими. Завдяки замкнутим виробничим моделям в рамках економічної системи, циркулярна економіка прагне підвищити ефективність використання ресурсів, зосереджуючись на міських та промислових відходах для досягнення кращого балансу та гармонії між економікою, довкіллям та суспільством. Ключовим елементом у цьому процесі є добре виконання утилізації суден, яка дозволяє повторне використання, відновлення, високоцінну переробку та впровадження інших циркулярних стратегій.

Європейський вектор розвитку України ставить вимоги щодо наближення стратегічних орієнтирів її економічної політики до стандартів й критеріїв ЄС. В Європейському Зеленому курсі (European Green Deal), а також в концепціях кліматичної нейтральності, соціальної справедливості, екологічної безпеки викладена сучасна стратегічна ціль розвитку ЄС. Риси формування та розвитку «зеленої» економіки задають цільові орієнтири для країн–кандидатів на членство. Маючи найбільші успіхи «зеленого» економічного зростання, порівняно з іншими регіонами світу, країни ЄС найбільше наблизилися до реалізації Глобальних цілей розвитку. Всі ці обставини та вимоги мають бути враховані при формуванні стратегії розвитку «зеленої» економіки України як майбутнього члена ЄС.

Глобальна зелена трансформація для економіки України, на думку авторів, це – модернізація, кліматична нейтральність, перехід на відновлювані джерела енергії, альтернативні види палива, декарбонізація промисловості, електрифікація транспорту, та впровадження «зелених» стандартів у суднобудівництві. Без сумніву, це ключовий процес для повоєнного відновлення, що сприяє створенню екологічно чистих галузей та стимулює сталий економічний розвиток.

Автори відзначають, що концепція «зеленої» економіки розглядається і на законодавчому рівні. Вона представлена низкою нормативно-правових актів: Розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Стратегії відновлення, сталого розвитку та цифрової трансформації малого і середнього підприємництва на період до 2027 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024–2027 роках» [2]; Указ Президента України «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року» [3], тощо.

Актуальність дослідження пов'язана з наступним:

– Кількість світового флоту зростає кожного року. Однозначно зростає кількість суден, що закінчили свій термін експлуатації.

- Стрімкий розвиток світової економіки призвів до значного скорочення життєвого циклу морських суден.
- За величиною експлуатаційних витрат «старі» судна стають неконкурентноздатними.
- Зростаюче число аварій суден, вік яких перевищує п'ятнадцять-двадцять років.
- Зі збільшенням загрози забруднення НС у зв'язку із зростанням відходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання утилізації суден у науковій літературі вивчається переважно з технічної, економічної або екологічної точок зору. Так в статті [4], розглянуті питання пов'язані зі впливом утилізації суден методом затоплення на екологію та безпеку судноплавства. Особливу увагу автори звернули на географічний фактор впливу на безпеку – стан судноплавних артерій. Показано динаміку утилізованих суден за останні 5 років та зазначено, що судноплавство може зробити важливий внесок у циклічну економіку. В економіці замкнутого циклу наявні вироби або матеріали залишаються у використанні довше і таким чином захищають природні ресурси Землі. Останніми роками утилізація старих суден стала проблемою для навколишнього середовища (НС), і ця проблема не зводиться до дотримання правил техніки безпеки на підприємствах з утилізації суден. Автори вказують, що базовим міжнародним стандартом в галузі екологічного менеджменту є стандарт ISO 14001:2004. Особливу увагу приділено Найробійській конвенції про видалення затонулих та затоплених суден та проблемам ратифікації цієї конвенції Україною. Автори визначили свою думку щодо основних проблемних позицій України у розвитку процесів утилізації суден та шляхів їх вирішення, що спрямовані на забезпечення екологічної безпеки та безпеки судноплавства. Крім того, підкреслюють вплив розвитку утилізації суден на відродження судноремонтних заводів України та суміжних галузей.

В роботі [5], автори провели аналіз екологічних ризиків, виникаючих при утилізації морських суден. Дане дослідження дозволяє ідентифікувати шкідливі фактори впливу на НС в процесі утилізації суден, а також спланувати необхідний комплекс заходів, направлених на зниження імовірності виникнення ризиків. Крім того, проведено літературний огляд, який показав основні напрямки рішення проблем, що виникають при утилізації.

У статі [6], автори підкреслюють, що питання утилізації суден у науковій літературі вивчається переважно з технічної, економічної або екологічної точок зору. Юридичні питання зазначеної проблематики не розкриваються або містяться згадки у незначній кількості у роботах вітчизняних та зарубіжних науковців.

В роботі [7], колектив авторів вказує, що однією з найважливіших проблем у світі є так званий «цвинтар суден». Затоплені та кинуті судна негативно впливають на навколишнє середовище, а також створюють загрозу безпеці судноплавства. У статті авторами подано короткий огляд затоплених суден в Україні їх вплив на навколишнє середовище, а також наведено результати аналізу процесів підйому та утилізації.

У статті [8], проведено аналіз стану законодавчого, організаційного та технологічного рівнів утилізації судів в Україні; визначено перспективи розвитку утилізаційного підприємства на базі наявних суднобудівних та судноремонтних заводів півдня України. Автором схематично представлено модель утилізації судна.

В роботі [9], колектив авторів звернув увагу на те, що однією із ключових проблем розвитку сучасного світового флоту є утилізація засобів водного транспорту, насамперед морських суден. Автори підкреслили, що проблемі утилізації суден сьогодні приділяється серйозна увага ЄС. Плани з забезпечення утилізації старих суден з використанням затверджених ЄС технологій розглянуто Європейською Комісією з НС. Проект постанови припускає контроль над переробкою суден під прапором країн ЄС або суден, що регулярно відвідують порти ЄС, на затверджених об'єктах з усього світу, що дозволить зменшити випадки негативних наслідків недбалої переробки судового лома, як аварій, нещасні випадки, завдання збитків здоров'ю людини або НС. Утилізація суден і кораблів різних типів і призначень, що відслужили свій термін – актуальна й, одночасно, досить складна і серйозна проблема не тільки у технологічному плані, але і є екологічною, економічною та правовою проблемою. Тому сьогодні, дуже важливими питаннями є питання вибору методу різання та розробки сучасних технологічних методів різання при утилізації суден. Результати дослідження підтвердили думку авторів, що найбільш перспективними методами різання є гідро-абразивне та механічне різання корпусу судна. Використання діаграми Ісікави дало можливість знайти взаємозв'язок між усіма причинами і факторами, що впливають на проблему та призвести оцінку їх впливу на неї.

У статті [10], автори вказують, що утилізація після закінчення терміну експлуатації суден і кораблів різних типів і призначення – актуальна і, одночасно, дуже складна і серйозна проблема не тільки в технологічному, економічному та правовому плані, але, і є серйозною екологічною проблемою. Автори підкреслюють, що в прийнятій Кабінетом Міністрів країни Національній транспортній стратегії для розв'язання системних проблем не передбачені нові шляхи і ефективні методи відновлення і розвитку судноремонтних заводів України, і взагалі не згадується про проблеми великої кількості покинутих і затоплених суден, пристаней, доків, причалів в затоках, в гирлах річок і навіть в портах. У статті показано значення, роль і вплив системи екологічного менеджменту на створення, і управління утилізаційним підприємством. Проведено узагальнення стандартів ISO 14000.

Стаття [11], присвячена рішення науко-технічної проблеми підвищення ефективності утилізаційних процесів, розробці методологічної бази та практичних рекомендацій для створення ефективного функціонування утилізаційного підприємства. Доказано, що робота утилізаційного підприємства базується на використанні стандартів серії ISO 9000.

Підтверджено, що вони універсальні, та в них передбачені основи для потреб та інтересів організацій специфічних секторів економіки, наприклад, таких як суднобудування.

Створення утилізаційного підприємства обумовлено збільшенням загрози забруднення НС у зв'язку із збільшенням суден, термін експлуатації яких перевищив 10-15 років і більше, а також на недостатньому вивченні цієї проблеми і відображенні у літературі. Сьогодні, в світовому науково-технічному співтоваристві відзначається тенденція до зміни пріоритетів в розстановці завдань розвитку транспортної системи, зокрема морської, і в даний час пріоритет віддається питанням екології. Підтверджено що, стандарт ISO 14001 визначає основні принципи системи екологічного менеджменту утилізаційного підприємства та є частиною системи менеджменту утилізації суден вимоги якого встановлені стандартом ISO 30000. Проведеним аналізом підтверджено, що кожне судно (як продукт) оказує вплив на суспільство, економіку та навколишнє середовище, і ці типи впливу можна розглядати як серію зв'язаних проєктів протягом життєвого циклу судна.

У роботі [12], розглянуті проблеми утилізації суден і проведено аналіз технологічних методів різання, що використовуються в теперішній час при утилізації суден. Було проведено аналіз методів і експертна оцінка різних показників різання. Всі показники були розбиті на чотири групи: енергетичні, економічні, екологічні та безпеки. Для різання корпусу можуть використовуватися термічні, механічні, імпульсні методи, а також, у перспективі, гідравлічне різання. Аналіз показав, що різні методи різання можна ефективно використовувати на різних етапах розділення судна. Особливу увагу заслуговує гідро абразивний метод різання.

У статті [13] був проведений аналіз можливостей і перспектив доцільності створення і розвитку на базі судноремонтних заводів підприємства утилізації або ділянки по утилізації суден.

У статті [14] розглянуті матеріали з однієї з процедур, що стосуються існуючих суден стосовно утилізації – підготовка «зеленого паспорта», що є документом, сприяючим застосування Керівництва ІМО і містить інформацію щодо матеріалів, відомих потенційно небезпечних і використаних в конструкції судна, його обладнанні та схемах.

Колектив авторів у статті [15] висвітлює актуальну проблему утилізації суден в Україні. Звертається увага на критичний стан морського та річкового українського торговельного флоту, значну кількість застарілих суден, а також брак сучасних потужностей для їх безпечної утилізації. Авторами проведено аналіз останніх досліджень у галузі утилізації суден, зокрема щодо формування системи екологічного менеджменту утилізаційних підприємств, вибору технологічних процесів утилізації, правового регулювання цієї сфери та ролі міжнародних конвенцій. Визначено перспективи створення в Україні сучасного утилізаційного підприємства на базі існуючих судноремонтних заводів.

У ході дослідження авторами здійснено візит на один із провідних турецьких заводів з утилізації суден «Simsekler» у м. Аліага. Проаналізовано чинники успіху цього підприємства: зручне географічне розташування, наявність суднобудівних та судноремонтних потужностей поруч, наявні земельні ділянки, доступ до утилізаційних заводів, належне виконання екологічних вимог. Проведено порівняння з можливостями організації використання суден в Україні. В результаті дослідження визначено, що для розвитку утилізації суден в Україні необхідно мати конкурентоспроможні за критеріями економічності та екологічності технології обробки корпусних частин, системи оцінки стану транспорту, ринку «секонд-хенд» деталей тощо. Запропоновано комплекс заходів: ратифікація міжнародних конвенцій, розробка національного законодавства, впровадження програм підтримки, адаптація підприємств. Обґрунтовано доцільність розвитку суднобудівної галузі в Україні як передумови для відродження потужностей з утилізації суден. Підкреслено потреби держаної підтримки та реструктуризації у цій сфері. Зроблено висновок, що утилізація суден може стати одним із шляхів реанімації вітчизняних суднобудівних і судноремонтних заводів.

Тематиці утилізації суден присвячені праці зарубіжних авторів, таких як: А. Келлі (A. Kelly), Дж. П. Меллор (J.P. Mallory), К. Джон (K. John), Дж. В. Булл (J.W. Bull), Р. Гой (R. Goy), А. Лілар (A. Lilar), С. Ван Ден Бош (C. Van Den Bosch). Їхні роботи охоплюють різні елементи цієї теми: методи демонтажу, утилізації та переробки матеріалів; вплив утилізації на довкілля та методи мінімізації цього впливу; міжнародні конвенції, національне законодавство та процедури, що регулюють процес утилізації; економічна доцільність та вигоди від утилізації.

Наприклад, в статті [16], колектив авторів відзначає, що переробка суден – це процес розбирання застарілого судна або його компонентів для повторного використання та переробки. На спеціалізованих об'єктах з переробки суден ця діяльність здійснюється для того, щоб допомогти відновити корисні матеріали, тоді як з небезпечними та іншими матеріалами слід поводитися обережно, що включає такі дії, як зберігання та обробка на місці. Сьогодні налічується близько 20 000 суден валовою місткістю понад 500 тонн, які у віці 20 років потребують переробки. Переробка суден була бурхливо розвиваючою галуззю протягом останніх двох десятиліть для кількох країн, таких як Бангладеш, Китай, Індія, Пакистан та Туреччина; оскільки вони переробляють 97-98 % світового тоннажу. На Бангладеш припадає понад 25 % світової частки. Тому уряди та міжнародні організації посилюють свої правила та запровадили правила екологічно безпечної переробки. Ця потреба розглядається як позитивна, і багато захисників довкілля виступають за посилення контролю. У 2009 році Міжнародна морська організація (ІМО) створила

Гонконзьку міжнародну конвенцію (ГМК) про безпечну та екологічно обґрунтовану переробку суден у відповідь на посилення регулятивного контролю. Ця угода встановлює суворі стандарти, спрямовані на забезпечення безпеки та захисту навколишнього середовища на верфях. Важливою частиною відповідності ГМК переробці відходів є наявність Плану переробки суден (SRFP). Нещодавно було прийнято Регламент Європейського Союзу про переробку суден (EU SRR), який забороняє метод відкритого викидання на берег та вимагає, щоб судна під прапором ЄС перероблялися на сертифікованих європейських верфях з переробки суден. Це аналітичне дослідження, спрямоване на виявлення недоліків та внесення покращень до роботи верфей з переробки в Бангладеш, щоб вони могли продовжувати свою діяльність у конкурентному світі.

Аналіз розглянутих джерел показав, що наукові дослідження та проблеми утилізації суден залишаються актуальними у всьому світі. Вони зосереджені на екологічних аспектах, впровадженні інноваційних технологій і посиленні міжнародного регулювання. Особлива увага приділяється принципам циркулярної економіки, переробці цінних матеріалів та мінімізації негативного впливу на НС.

У червні 2025 року була ратифікована Гонконгська міжнародна конвенція, тому автори вважають, що повернення до розгляду її впливу на екологічні аспекти утилізації є своєчасним і актуальним.

Формулювання мети дослідження

Будь яке судно має свій термін життєвого циклу, який включає термін експлуатації судна. Після закінчення безпечного терміну експлуатації судно стає джерелом підвищеної небезпеки та неминуче постає питання його утилізації.

Безпечна та нешкідлива утилізація морських суден є вкрай актуальним питанням.

Закінчення терміну експлуатації судна породжує наступні ризики: фінансові затрати судовласника на утримання старого судна, забруднення НС, загроза життю та здоров'ю людей.

Ненормований та безконтрольний процес утилізації суден приводить до шкоди як екології так і людям, які задіяні під час утилізації та які живуть біля місць утилізації.

Актуальним є питання нормативної регламентації утилізації морських та річкових суден. Формування техніко-юридичних стандартів на міжнародному та державному рівні, та їх впровадження і виконання.

Тому, аналіз стану утилізації морських суден, слідування за стандартами міжнародного рівня та їх впровадження допомагає при вирішенні та розв'язанні цієї проблеми.

Викладення основного матеріалу дослідження

В умовах глобальної «зеленої» трансформації економіки металобрухт набув особливої цінності як сировина.

Наприклад, у боротьбі з викидами CO₂, за планами до 2030 року, Китай має намір збільшити споживання сталевих металобрухту на 23 % порівняно з 2020 роком, доводячи показник до 320 мільйонів тонн на рік, що свідчить про зростання його використання для досягнення цілей щодо «чистого виробництва сталі». В країні діють обмеження на збільшення потужностей конвертерного виробництва, що сприяє переходу до використання брухту [17].

Одне зі значних джерел поповнення запасів вторсировини – утилізація застарілого чи незатребуваного флоту.

Проте все залежить від чисельності та стану власного флоту держави. На жаль, стан флоту України не витримує жодної критики, а перспективи суднорозбирання невеликі, хоча є мінімальний ринок. Майже весь український морський та річковий флот складається із суден малої водотоннажності: баржі, буксири, пасажирські та спеціальні плавзасоби. Більшість державного флоту – морально та фізично застарілі судна, які давно вичерпали свій ресурс експлуатації. Крім того, майже 90 % нових плавзасобів належать приватним власникам.

«Основою вантажного флоту є суховантажі, нормативний термін служби яких сягає 22-25 років. Вантажні судна, що плавають під українським прапором, мають середній вік близько 40 років. Серед них 20 % (17 од.) мають вік понад 50 років, найстарішому – 63 роки. Загалом понад нормативний термін експлуатується понад 90 % загальної кількості суден», – казав Сергій Лисенко, виконавчий директор асоціації «Укрсудпром» [18].

«Легкодоступного суднового металобрухту в країні практично не лишилося. Усі доступні плавзасоби вже перероблені чи реалізовані під утилізацію зарубіжним споживачам. Винятком є державні власники, які через законодавчі або інші бюрократичні особливості не можуть зняти з балансу і віддати на утилізацію свої плавзасоби», – казав Олександр Шейко, в.о. голови Науково-експертної ради асоціації «УАВтормет» [18].

Автори підкреслюють, що процес утилізації суден в Україні, наприклад, на потужностях судноремонтних заводів є достатньо дорогим і супроводжується технічними та бюрократичними труднощами.

Процес переробки плавзасобів на металобрухт, особливо затонулих, пов'язаний з необхідністю отримання великої кількості дозвільних документів, перевірками екологічних та інших органів і тому несе високі корупційні ризики.

Крім того, в Україні є дефіцит сучасної техніки для підйому затонулих суден. Спостерігається і гостра нестача спеціалістів із виконання таких робіт. Підтвердження цьому ствердженню є той факт, що біля берегів Одеси рік не могли підняти 59-метровий танкер Delfi, потім ще рік у судах вирішували, кому належить судно та на кого повісити збитки.

Статистичний облік утилізації плавзасобів в Україні не ведеться, процес списання та утилізації плавзасобів має випадковий і несистемний характер. За даними [18], щороку в Україні переробляють на металобрухт близько 10-15 суден середньої та малої водотоннажності – здебільшого барж та різних катерів.

«...В Україні немає галузі суднопереробки, тому що немає ні флоту, ні технічної можливості для утилізації навіть середніх суден – немає як фахівців, так і місць. Той маломірний флот, який є в Україні, практичного інтересу для брухтозаготівлі не становить ... на Чорному морі немає усталеної практики суднопереробки. Усі більшість великі плавзасоби відправляють на утилізацію в Середземне море на суднопереробну верф турецького міста Аліага» [18].

У січні 2022 року на світовий ринок розбирання суден на брухт повернувся підвищений оптимізм. Як повідомляє Hellenic Shipping News з посиланням на останній щотижневий звіт судового брокера Clarkson Platou Hellas, серед переробників списаних плавзасобів спостерігається високий попит та готовність купити будь-яке виставлене на продаж судно. Гравці очікують на зростання цінних індикаторів, особливо на індійському узбережжі [19].

На думку авторів, утилізація судна є одним з основних принципів стійкого розвитку держави. З точки зору виведення суден, що відслужили свій термін, є мало альтернатив утилізації – постановка судна на ремонт лише відкладає вирішення питання; є лише обмежена можливість переобладнання суден для інших видів використання; умисне потоплення судна, строго регульоване Лондонською конвенцією, не дає можливості утилізувати сталь та інші матеріали та устаткування [20].

На початку січня 2025 року світовий портфель замовлень склав 5404 судна сумарним дедвейтом 346,2 млн. DWT (150,6 млн. CGT), що на 15 % більше показників 2023 року в величинах CGT. Такі дані наводить аналітичне бюро Clarksons Research [20]. Аналіз даних [21] дозволив скласти підсумкову таблицю кількості суден, відправлених на утилізацію у 2020 – 2024 (рис. 1).

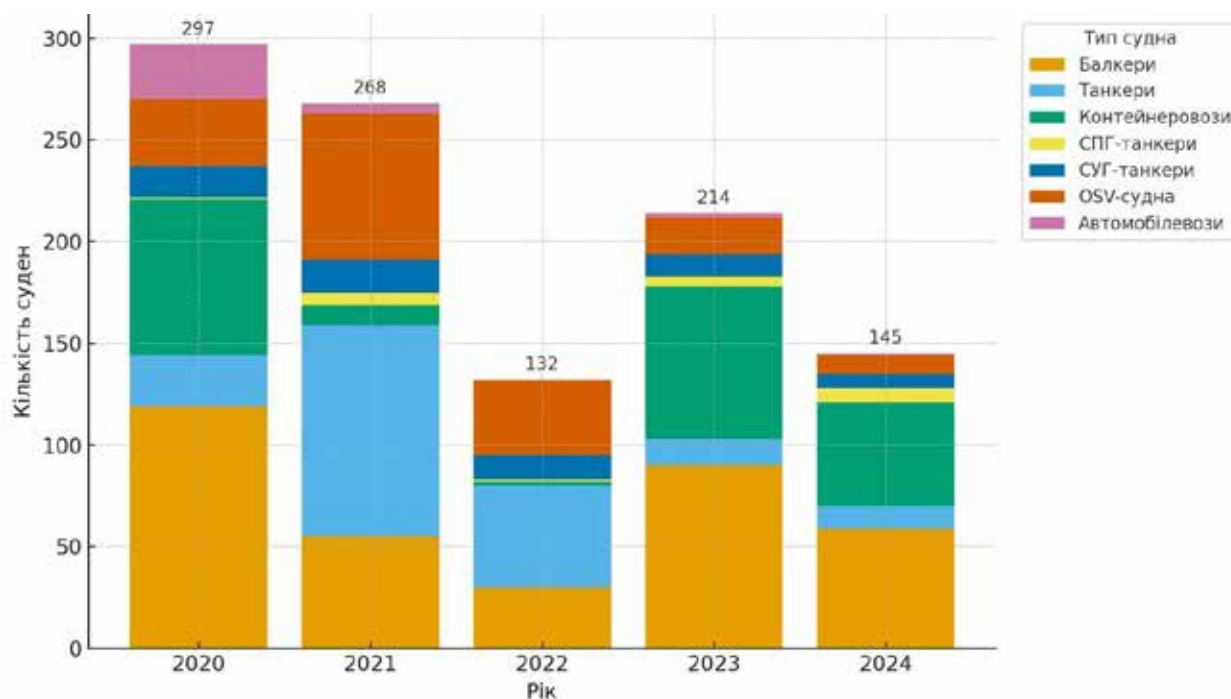


Рис. 1. Кількість суден відправлених на утилізацію в світі у 2020 – 2024 рр.

Джерело: розроблено авторами на основі аналізу [21]

З аналізу слідуює, що за період 2020 – 2024 рр:

1. Найбільш велика кількість балкерів, контейнеровозів, автомобілевозів була відправлена на утилізацію у 2020 році і разом склала 223 судна; танкерів та OSV-суден у 2021 році – 192 судна.

2. За період 2020 – 2024 роки було відправлено на утилізацію найменша кількість усіх типів суден разом – 132 судна.

Якщо спрогнозувати динаміку на слідуючи 5 років, то побачимо наступні тенденції (рис 2). Але графік, побудований як лінійна екстраполяція має 5 спостережень на кожен сегмент; не враховує «шоків» (фрахт, кон'юнктура сталі, санкції, страхування, війна), а також можливих залпових списань через нові екостандарти. Це базовий, консервативний сценарій.

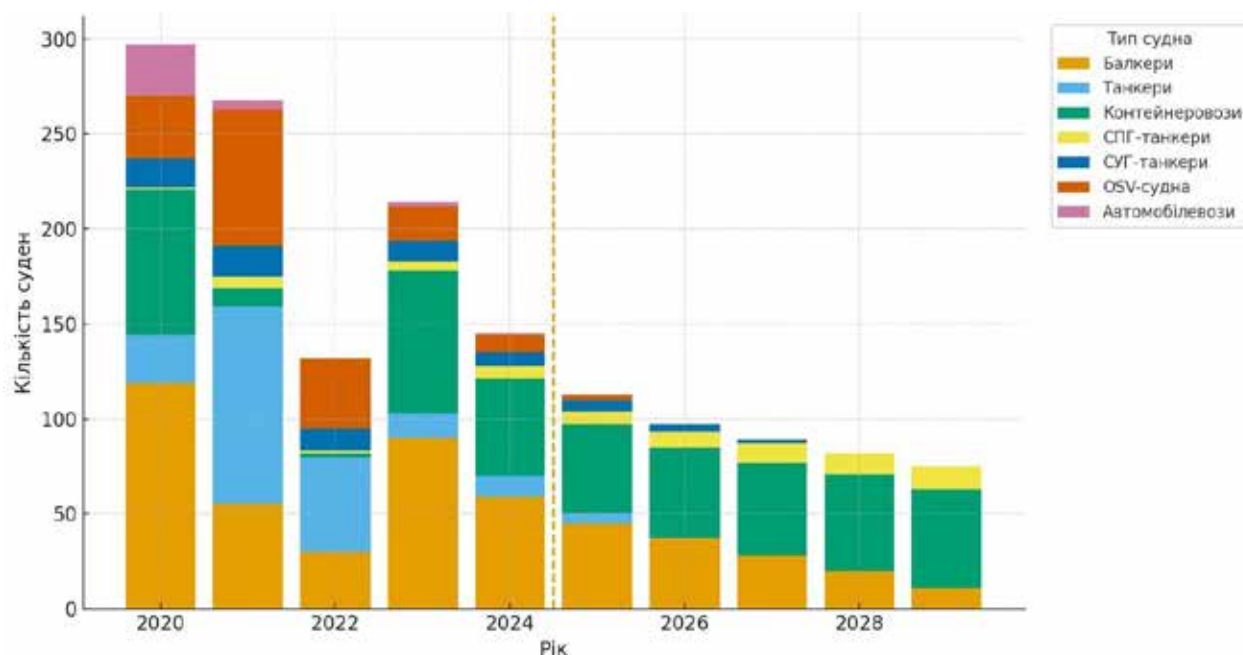


Рис. 2. Прогноз утилізації суден до 2029 року

Джерело: розроблено авторами

Загальний обсяг утилізації знижується: середнє 2020–2024 = 211 суден/рік, прогноз 2025–2029 = ≈ 91 судно/рік (-57 %).

Структурний зсув на користь контейнеровозів. Їхня частка зростає з ~ 26 % (2020) та ~ 35 % (2024) до ~ 69 % у 2029 р. (≈ 52 із 75).

Балкери: спад із 119 (2020) до ~ 11 (2029).

Танкери: пік у 2021 (104), подальший спад до ≈ 0 після 2026.

OSV (offshore service vessels): високі 2020 – 2021, майже до нуля після 2026.

СПГ-танкери (LNG): повільне зростання (до ~ 12 у 2029), але абсолютні значення малі.

СУГ-танкери (LPG) та автомобілевози: рух до мінімальних значень (0–1 на рік наприкінці горизонту).

Ряд має високу мінливість (провал 2022, відскок 2023), тож фактичний ринок чутливий до циклів фрахту, цін на сталь і регуляторики.

Автори проаналізували дані джерела [22] та склали підсумкову таблицю 1.

Таблиця 1

Кількість суден відправлених на утилізацію у першому півріччі 2025 року

Тип судна / Дії з судном	Балкери	Танкери	Контейнеровози	СПГ- Танкери	СУГ- Танкери	OSV- судна	Авто- Мобілевози	Загальна сума суден
2025	34	15	4	7	6	7	0	73

Розроблено авторами на основі аналізу [22]

Аналіз таблиці 2 показав, що на утилізацію відправлено всього 73 судна.

При порівнянні з 2024 роком, на думку авторів, відправка суден на утилізацію йде повільно.

За даними [22]:

– В утилізацію відправили всього 34 балкери, переважно старше 29 років. У лідерах зі зламу – Post/Panamax та Handysize. Більшість суден продовжують працювати, оскільки доходи та вигода від експлуатації залишаються на високому рівні.

– Демонтовано 15 Актуальність дослідження танкерів (близько 1,2 млн. DWT), особливий приріст тут спостерігається в класах Panamax (75 000 DWT) та Handy, середній вік – понад 25 років. Основними країнами утилізації стали Індія, Бангладеш та Туреччина, причому близько 60 % суден пішли в Індію.

– Списано всього 4 контейнеровози (140-700 TEU, у сумі менше 0,2 млн DWT). Середній вік суден, на злам – 16,6 років.

– СУГ-танкерів на утилізацію за перше півріччя пішло 6 суден (до 0,1 млн. DWT), усі – малотоннажні й переважно старше 20 років.

- DWT). Утилізують насамперед старі паркові судна з паровою силовою установкою.
- Утилізація офшорних суден 2025 року залишалася відносно стабільною: списано 7 суден, що близько до рівня 2024 року. Злам пов'язаний зі старінням суден, середній вік яких перевищує 30 років (АНТС і дрібні PSV, менше 70 тис. DWT сумарно). Поки що сильний попит на нові та сучасні судна обмежує обсяги утилізації, але в середньостроковій перспективі очікується зростання, особливо після постачання нових замовлень.
- Зафіксовано відсутність списань автомобілевозів на брукх у поточному періоді, чого не було давно. Проте понад 100 автомобілевозів з існуючого флоту мають вік понад 25 років, і очікується інтенсивне зростання утилізації саме з 2026 по 2027 рік, особливо в умовах жорсткості екологічних та експлуатаційних стандартів.

За даними [23], у 2025 році світовий флот досяг дедвейту понад 2,35 млрд тонн, проте темпи його зростання почали знижуватися. На початок липня кількість нових замовлень склала близько 6007 суден на 388 млн. DWT, що на 50 % менше у порівнянні з минулим роком. Перша половина року пройшла під знаком обережного очікування, викликаного геополітичними ризиками та змінами у ланцюжках постачання. Інфляція та зростання відсоткових ставок змушують судновласників переглядати свої плани. Проте, попит на сучасні великотоннажні судна продовжує залишатися високим, особливо у сегменті контейнеровозів. Загальна кількість нових замовлень у першому півріччі становила лише 169 одиниць, що є рекордно низьким показником. Вторинний ринок також демонструє зниження активності. У той же час, старий флот залишається в експлуатації, оскільки власники прагнуть максимально використати його потенціал. В офшорному сегменті спостерігається зростання нових замовлень, що віщує позитивні зміни в цьому напрямку. Однак, незважаючи на зниження ділової активності, попит на сучасні судна продовжує залишатися на рівні, що сприятиме оновленню флоту.

На думку авторів, на розвиток і прогнози у суднобудуванні зараз значно впливає «зелений» чинник. Замовлення на будь-який тип нового судна часто ґрунтується на припущенні принаймні про двадцятирічний термін експлуатації та оцінку вантажної бази. Кількість суден вторинного ринку та проданих на злам буде збільшуватися.

Питання утилізації суден залишаються відкритими та актуальними.

Зростаючий попит на переробку суден призвів до запровадження суворіших правил на місцевому та міжнародному рівнях для забезпечення безпеки та дотримання вимог. Для забезпечення безпеки та захисту навколишнього середовища ІМО створила ГМК для безпечної та екологічно обґрунтованої переробки суден у 2009 році через зростаючі регуляторні вимоги.

У 2009 році в Гонконзі була прийнята Гонконгська міжнародна конвенція (ГМК) Міжнародної морської організації (ІМО) про безпечну та екологічно безпечну утилізацію суден. ГМК спрямована на те, аби злам суден не створював загрози для НС та ризику для здоров'я й безпеки працівників.

«Це знаменує кардинальні зміни для переробної галузі. Найближчим часом судновласники будуть впевнені, що застарілі судна знайдуть безпечне та екологічне місце утилізації. Важливість набуття Конвенцією чинності та її значення для перероблення суден у всьому світі не можна недооцінювати», – прокоментував старший менеджер з НС та торгівлі Міжнародної палати судноплавства Джон Стауперт [24].

Конвенція встановлює стандарти щодо переробки суден та покладає відповідальність за виконання за державою прапора судна та державою переробки. Створенню Конвенції передувало прийняття в 2003 році Асамблеєю ІМО Керівництва з розбирання суден і потім прийняття в 2005 році 24 сесією Асамблеї ІМО рішення про необхідність розробки обов'язкового інструменту для глобального застосування. Гонконгська конвенція мала набрати чинності, після того, як будуть виконані певні критерії, включаючи ратифікацію не менше 15 державами, що становлять не менше 40 % світового торговельного флоту за валовим тоннажем, та мають потужності з утилізації суден не менше 3 % від валового тоннажу об'єднаного торговельного флоту цих держав.

Згідно статті 3 Конвенція застосовується до: «... суден 500 і більше тонн» [25].

Конвенція не застосовується: «... до військових кораблів, військових допоміжних суден, а також суден, що використовуються для державної некомерційної служби».

Конвенція також не застосовується «до суден, що працюють весь термін служби в водах, що знаходяться під юрисдикцією держави, прапор якої вони несуть» [25].

Конвенція вводить поняття як «*Ship recycling facility*» (стаття 2 Визначення) [25], яке українською мовою можна перекласти як доки, верфі, споруди та інше. Ця угода встановлює суворі стандарти, спрямовані на забезпечення безпеки та захисту НС на верфях. Важливою частиною відповідності ГМК процесу переробки верфі повинні мати План об'єкта з переробки суден. Цей план повинен демонструвати системи, процеси та обладнання верфі, які були впроваджені для забезпечення безпеки та захисту НС. План повинен містити необхідну інформацію про об'єкт з переробки суден, включаючи його планування, глибину води, доступність, технічне обслуговування та вимоги до днопоглиблення. Це безцінний ресурс для всіх, хто хоче зрозуміти, як працюють ці об'єкти.

Особливу увагу Конвенція приділяє інспектуванню судна, яке буде утилізуватись або яке ще виконую рейси. У Додатку до Конвенції, який називається Рекомендації до безпечної та екологічної утилізації суден, є перелік необхідних процедур для об'єктів з утилізації суден та до суден які будуть утилізуватись.

До 26 червня 2025 року, поки не вступила в силу ГМК, Міжнародна морська організація на своїй базі створила декілька Резолюцій з утилізації суден.

Автори підкреслюють, що Резолюції носили лише рекомендаційний характер і держави цих настанов могли не дотримуватися, і це було проблемою.

Варто перерахувати ці резолюції:

- Резолюція ІМО МЕРС.196 (62) – керівництва з розробки плану переробки суден (прийнята 15 липня 2011 року);
- Резолюція МЕРС.222 (64) – рекомендації для обстеження/огляду та сертифікації суден за Гонконгською конвенцією (прийнята 15 жовтня 2012 року);
- Резолюція МЕРС.223 (64) – вказівки до інспекції суден за Гонконгською конвенцією (прийнята 5 жовтня 2012 року);
- Резолюція МЕРС.210 (63) – вказівки з безпеки та екологічної утилізації суден (прийнята 2 березня 2012 року);
- Резолюція МЕРС.211 (63) – рекомендації з авторизації об'єктів з утилізації суден (прийнята 2 березня 2012 року);
- Резолюція МЕРС 269(68) – Керівні принципи розробки інвентаризації небезпечних матеріалів (прийнята 15 травня 2015).

Крім того, Європейський Парламент та Рада Європейського Союзу прийняли Регламент з утилізації суден (EU SRR) 20 листопада 2013 року. Метою Регламенту є зниження негативних наслідків, пов'язаних з утилізацією суден.

З 31 грудня 2018 року комерційні судна під прапором ЄС понад 500 GT повинні бути перероблені на безпечних і екологічно безпечних підприємствах з утилізації суден, які включені до Європейського списку затверджених підприємств з утилізації суден [26]. Список був вперше складений 19 грудня 2016 року і періодично оновлюється для додавання додаткових відповідних коштів або, як альтернатива, для видалення об'єктів, які перестали відповідати. Список включає об'єкти, що діють в глобальному масштабі [27].

Правова база утилізації морських суден в Україні базується на Законі України «Про відходи» та загальних нормативних актах щодо судноплавства. Процес утилізації суден, які класифікуються як відходи, регулюється положеннями цього закону, а також міжнародними конвенціями та національними вимогами до утилізації суден.

Закон України «Про відходи» (від 19.06.2025 № 4510-IX) є головним документом, який регулює поводження з відходами в Україні, включаючи процес їх утилізації.

Для включення в Європейський список підприємство з утилізації суден, незалежно від його місця розташування, повинно відповідати ряду вимог безпеки і охорони НС. Список вимог дуже жорсткий та більш розширений ніж у ГМК. Що б бути включеним до цього списку (стаття 13), об'єкт з переробки суден повинен відповідати наступним вимогам, відповідно до відповідних положень ГМК та з урахуванням відповідних керівних принципів ІМО, МОП, Базельської конвенції та інші міжнародні керівні принципи: «...він (об'єкт) спроектований, побудований та експлуатується безпечно та екологічно безпечно; встановлює системи управління, моніторингу, процедури та методи, які мають на меті запобігання, зменшення, мінімізацію та, наскільки це можливо, усунення: – ризики для здоров'я зацікавлених робітників та населення в околицях підприємства з переробки суден, та шкідливий вплив на НС, спричинений переробкою суден...» [27] та особливо, що: «...він встановлює та підтримує план готовності та реагування на надзвичайні ситуації; забезпечує швидкий доступ обладнання для реагування на надзвичайні ситуації, такого як обладнання для пожежогасіння та транспортні засоби, машини швидкої допомоги та крапи, до судна та всіх районів устаткування для переробки суден...» [28].

Саме у Регламенті зазначено, що: «...він (об'єкт) передбачає безпеку та навчання працівників, включаючи забезпечення використання засобів індивідуального захисту для операцій, що вимагають такого використання...» це не вказано у Гонконгській Конвенції [28]. Особливу увагу приділяють «...він (об'єкт) встановлює облік інцидентів, нещасних випадків, професійних захворювань та хронічних наслідків і, на запит компетентних органів, повідомляє про будь-які інциденти, нещасні випадки, професійні захворювання чи хронічні наслідки, що спричиняють або можуть спричинити ризики для безпеки працівників, здоров'я людей та довкілля...».

26 червня 2025 року набула чинності ГМК, щодо безпечної та екологічної утилізації суден (*The Hong Kong International Convention for the Safe and Environmentally Sound Recycling of Ships, 2009*), це відбулось через 14 років після її прийняття ІМО в 2009 році в Гонконзі [29].

Наразі до Гонконгської конвенції долучилися: Бангладеш, Бельгія, Бонайре Сінт-Естатіус і Саба (Карибські Нідерланди), Гана, Данія, Естонія, Індія, Іспанія, Конго, Ліберія, Люксембург, Мальта, Маршалові Острови, Нідерланди, Німеччина, Норвегія, Панама, Пакистан, Португалія, Сан-Томе і Прінсіпі, Сербія, Туреччина, Франція, Хорватія та Японія.

Україна не ратифікувала ГМК. Ратифікація конвенції означає, що країна офіційно приєднується до неї та зобов'язується виконувати її положення.

Однак, автори підкреслюють, що Україна ратифікувала Базельську конвенцію про контроль за транскордонним перевезенням небезпечних відходів та їх видаленням [30], також в Україні є деякі підприємства, що займаються утилізацією небезпечних відходів та морських транспортних засобів, наприклад, компанія «УтильВторПром», держпідприємство «Українське Дунайське пароплавство», Миколаївський суднобудівний завод, Київський суднобудівно-судноремонтний завод та деякі інші.

Загалом держави, які ратифікували ГМК, представляють близько 45,81 % світового торговельного флоту, а їхній сукупний обсяг утилізації суден за попередні 10 років становить 23,85 млн тон, що еквівалентно 3,31 % бруто-тоннажу.

Гонконгська конвенція – це міжнародний договір, який регулює безпечну та екологічно безпечну утилізацію суден, що виводяться з експлуатації. Договір, також відомий як Міжнародна конвенція про безпечну та екологічно безпечну утилізацію суден. Конвенція зобов'язує країни-учасниці забезпечити, щоб судна, утилізовані на їх території, відповідали певним стандартам безпеки та екологічним вимогам. Конвенція також покладає відповідальність за утилізацію на державу прапора судна та державу, де відбувається утилізація.

Основні положення ГМК, що впливають на утилізацію суден [29]:

Безпечна утилізація суден – Конвенція встановлює стандарти для безпечної утилізації суден, включаючи вимоги до проектування, будівництва, обладнання та експлуатації суден.

Екологічна безпека – Конвенція вимагає, щоб утилізація суден не шкодила НС.

Відповідальність – Конвенція покладає відповідальність за утилізацію суден на державу прапора судна та державу, де відбувається утилізація.

Інвентаризація шкідливих матеріалів – Конвенція вимагає, щоб судна мали перелік шкідливих матеріалів, які містяться на борту, таких як азбест, свинець та ртуть.

Сертифікація – Конвенція передбачає систему сертифікації суден, які відповідають її вимогам.

Взаємне визнання – Конвенція передбачає взаємне визнання сертифікатів відповідності між державами-учасницями.

Кожне судно, яке підлягає утилізації, повинно мати на борту Перелік небезпечних матеріалів, визначених ГМК. Перелік небезпечних матеріалів, застосування яких заборонено або обмежено на суднобудівних підприємствах, судноремонтних заводах та суднах держав-сторін, наведено у Додатку до ГМК. Судна повинні проходити первісний огляд для перевірки переліку небезпечних матеріалів, огляди протягом експлуатації та заключний огляд перед утилізацією судна.

Підприємства з утилізації суден повинні розробити План з утилізації суден на підприємстві, в якому буде вказано спосіб утилізації кожного конкретного судна залежно від його характеристик та переліку небезпечних матеріалів. Держави-сторони повинні забезпечити відповідність підприємств щодо утилізації суден під їх юрисдикцією положенням ГМК [20, 29].

Наслідки ратифікації ГМК для країни, що її ратифікує [29]:

Покращення екологічної ситуації – Конвенція сприятиме більш екологічно безпечній утилізації суден, що зменшить забруднення НС.

Збереження здоров'я людей – Безпечна утилізація суден зменшить ризики для здоров'я працівників, зайнятих у цій сфері, та для населення, яке проживає поблизу місць утилізації суден.

Підвищення міжнародного іміджу країни – Ратифікація конвенції продемонструє прихильність країни до міжнародних екологічних стандартів і зобов'язань, що може покращити її міжнародний імідж.

Розвиток галузі утилізації суден – Конвенція може сприяти розвитку галузі утилізації суден в країні, якщо будуть створені необхідні умови та інфраструктура.

Таким чином, розглянуто стан утилізації морських суден, який показав, що питання утилізації суден залишаються відкритими та актуальними. Ратифікація ГМК буде сприяти поліпшенню екологічних умов утилізації суден та розвитку галузі утилізації суден.

Висновки

1. На даному етапі розвитку світу та України зростає потреба в «зеленій» утилізації морських суден для зменшення відходів, пов'язаних з демонтажем суден. Однак, автори відзначають, що в Україні не існує комплексної державної політики щодо впровадження та розвитку «зеленої» економіки, а стратегія сталого розвитку країни має лише декларативний характер, що унеможливило її практичне виконання.

2. Екологічні проблеми в індустрії переробки суден, стають дедалі очевиднішими. Завдяки замкнутим виробничим моделям в рамках економічної системи, циркулярна економіка прагне підвищити ефективність використання ресурсів, зосереджуючись на міських та промислових відходах для досягнення кращого балансу та гармонії між економікою, довкіллям та суспільством. Ключовим елементом у цьому процесі є добре виконана утилізація суден, яка дозволяє повторне використання, відновлення, високоцінну переробку та впровадження інших циркулярних стратегій.

3. Для нормальної регуляції та впровадження «зеленої» утилізації суден в Україні потрібно провести великий комплекс робіт:

- ратифікувати Конвенцію ІМО про безпечну та екологічно безпечну утилізацію суден (Гонконгська конвенція 2009 р.) та Регламент Європейського Союзу з утилізації суден для того, щоб об'єкти з утилізації суден України були внесені до Європейського списку з утилізації суден;
 - розробити закони та стандарти для безпечної утилізації суден в Україні, яких взагалі немає в Україні на даний момент;
 - розробити програму дотацій для підприємств України, на яких будуть утилізуватися українські судна;
 - привести у придатний до безпечної утилізації суден верфі, або відвести спеціальні місця для утилізації суден;
4. В Україні відсутні комплексні закони та стандарти, що регулюють саме утилізацію суден, але існують загальні законодавчі рамки, що стосуються управління відходами, які можуть застосовуватися. Проте на даний момент немає спеціалізованих національних норм для безпечної утилізації суден, що відрізняє її від типового управління побутовими відходами.

Список використаної літератури

1. About green economy. United Nations Environment Programme : вебсайт. URL:<https://www.unenvironment.org/explore-topics/green-economy/about-green-economy> (дата звернення: 17.11.2025).
2. Про схвалення Стратегії залучення, використання та ... Офіційний портал Верховної Ради України. URL:<https://zakon.rada.gov.ua> (дата звернення: 17.11.2025).
3. Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року. URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text> (дата звернення: 17.11.2025).
4. Вплив утилізації суден методом затоплення на екологію та безпеку судноплавства = The impact of ship disposal by the flood method on the ecology and safety of shipping / Л. В. Пізінцалі, О. М. Шумило, Н. І. Александровська, О. І. Россомаха, Т. В. Рабоча, О. А. Россомаха // Збірник наукових праць НУК. Миколаїв : НУК, 2022. № 1 (488). С. 3–11.
5. Пізінцалі Л. В., Александровська Н. І. Аналіз екологічних ризиків, виникаючих при утилізації морських суден // Новітні технології : збірник наукових праць Приватного вищого навчального закладу «Університет новітніх технологій». Київ : ПВНЗ «Університет новітніх технологій», 2019. Вип. 2(9). С. 140–148.
6. Савич О. С., Дудніченко К. В. Правове регулювання утилізації суден // Прикарпатський юридичний вісник. 2020. № 5(34). С. 160–165.
7. Александровська Н., Россомаха О., Пізінцалі Л., Россомаха О., Рабоча Т., Малишкін О. Судноремонт та утилізація: екологічні виклики затонулих суден України // Вісник Одеського національного морського університету. 2025. Вип. 75. С. 122–143. URL:<https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-1-122> (дата звернення: 17.11.2025).
8. Пізінцалі Л. В. Україна – проблеми утилізації морських суден // Східно-Європейський журнал. 2016. № 7. С. 100–104. URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/ukraina-problemy-utilizatsii-morskih-sudov> (дата звернення: 17.11.2025).
9. Пізінцалі Л. В., Александровська Н. І., Россомаха О. І., Россомаха О. А., Рабоча Т. В. Аналіз сучасних технологічних методів різання при утилізації суден з використанням побудови діаграми Ісікави // Scientific Collection «InterConf». Orléans : Epi, 2022. (105): Current Issues and Prospects for The Development of Scientific Research (19–20 April 2022). Р. 430–447. ISBN 978-2-7045-4521-6. DOI: 10.51582/interconf.19-20.04.2022.
10. Пізінцалі Л. В., Александровська Н. І., Россомаха О. І., Нікіфоров Ю. А., Шахов В. І., Рабоча Т. В. Принципи формування системи екологічного менеджменту підприємства з утилізації морських суден в Україні // Водний транспорт. 2020. № 1(29). С. 83–96. DOI: 10.33298/2226-8553/2020.1.29.10.
11. Пізінцалі Л., Александровська Н., Никифоров Ю. Інтегрована система менеджменту – основа створення проекту утилізаційного підприємства // Вісник Одеського національного морського університету. 2020. Т. 58, № 1. С. 207–225. URL:<http://visnyk.onmu.odessa.ua/index.php/1/article/view/19> (дата звернення: 17.11.2025).
12. Пізінцалі Л. В., Александровська Н. І., Варбанець Р. А. Вибір технологічного процесу утилізації корпусу судна методом експертних оцінок // Вісник АГТУ. Серія: Морська техніка і технологія. 2015. № 1. С. 14–20.
13. Пізінцалі Л. В. Доцільність створення утилізаційного підприємства на базі судноремонтного заводу // Вісник ОНМУ. 2015. Вип. 4(46). С. 170–183.
14. Пізінцалі Л. В. Підготовка «зеленого паспорта» як процедури міжнародних вимог до організації підприємства з утилізації суден // Вісник ОНМУ. 2015. Вип. 2(44). С. 177–185.
15. Россомаха О. І., Александровська Н. І., Пізінцалі Л. В., Россомаха О. А., Рабоча Т. В., Малишкін О. В. Завод з утилізації суден: чи потрібен він Україні? // Наука і техніка сьогодні. 2024. № 3(31). С. 953–974.
16. Mohiuddin M. G., Hossain B. A., Islam M. S. Analysis of present global ship recycling status and challenges for Bangladesh // Global Scientific Journal. 2023. Vol. 11, Issue 4. ISSN 2320-9186. URL:<https://www.globalscientificjournal.com> (дата звернення: 17.11.2025).
17. Китай до 2025 року має намір наростити потужності з... URL:<https://gmkn.center> (дата звернення: 17.11.2025).

18. Водні ресурси: запаси суднового брухту в Україні сягають 1,2 млн т. URL:<https://gmk.center.ua/posts/vodni-resursi-zapasi-sudnovogo-bruhtu-v-ukraini-syagajut-1-2-mln-t> (дата звернення: 17.11.2025).
19. Свистати всіх на верф: ситуація на ринку утилізації суден загострюється. URL:<https://gmk.center.ua/posts/svistati-vsih-na-verf-situaciya-na-rinku-utilizacii-suden-zagostryuetsya> (дата звернення: 17.11.2025).
20. Пізінцалі Л. В. Методологічні основи організаційно-технологічних процесів утилізації суден : монографія. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2021. 308 с. ISBN 978-966-289-488-2.
21. Світове суднобудування – підсумки 2024 року та тенденції 2025 року. URL:<https://paluba.media/news> (дата звернення: 17.11.2025).
22. Світове суднобудування за першу половину 2025 року. URL:<https://paluba.media/news/200677> (дата звернення: 17.11.2025).
23. Світовий флот у 2025 році: уповільнення зростання і... URL:<https://euroshiny.com.ua> (дата звернення: 17.11.2025).
24. Гонконгська конвенція про утилізацію суден... Ukrainian Shipping Magazine. URL:<https://usm.media> (дата звернення: 17.11.2025).
25. Ship recycling: reducing human and environmental impacts : Science for Environment Policy. URL:https://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/ship_recycling_reducing_human_and_environmental_impacts_55si_en.pdf (дата звернення: 17.11.2025).
26. Commission Implementing Decision (EU) 2020/1675 of 11 November 2020 ... URL:<https://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32020D1675> (дата звернення: 17.11.2025).
27. Про ліцензування видів господарської діяльності : Закон України від 02.03.2015 р. № 222-VIII. URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/222-19#Text> (дата звернення: 17.11.2025).
28. Про металобрухт : Закон України від 05.05.1999 р. № 619-XIV. URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/619-14#Text> (дата звернення: 17.11.2025).
29. Набула чинності Конвенція про екологічну утилізацію суден. URL:<https://shipregister.ua> (дата звернення: 17.11.2025).
30. Резолюція А.962(23) Керівництво ІМО з утилізації суден 2003. URL:http://rise.odessa.ua/texts/A962_23_03.php3 (дата звернення: 17.11.2025).

References

1. United Nations Environment Programme. (n.d.). About green economy. Retrieved November 17, 2025, from <https://www.unenvironment.org/explore-topics/green-economy/about-green-economy>
2. Verkhovna Rada Ukrainy. (n.d.). Pro skhvalennia Stratehii zaluchennia, vykorystannia ta ... [On approval of the Strategy for attraction and use ...]. Retrieved November 17, 2025, from <https://zakon.rada.gov.ua>
3. Verkhovna Rada Ukrainy. (2019). Pro Tsili staloho rozvytku Ukrainy na period do 2030 roku [On the Sustainable Development Goals of Ukraine until 2030]. Retrieved November 17, 2025, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text>
4. Pizintsali, L. V., Shumylo, O. M., Aleksandrovska, N. I., Rossomakha, O. I., Rabocha, T. V., & Rossomakha, O. A. (2022). Vplyv utylizatsii suden metodom zatoplennia na ekolohiiu ta bezpeku sudnoplavstva [Impact of ship disposal by the flood method on ecology and navigation safety]. Zbirnyk naukovykh prats NUK, 1(488), 3–11. [in Ukrainian].
5. Pizintsali, L. V., & Aleksandrovska, N. I. (2019). Analiz ekolohichnykh ryzykiv pry utylizatsii morskikh suden [Analysis of environmental risks during ship recycling]. Novitni tekhnologii, 2(9), 140–148. [in Ukrainian].
6. Savych, O. S., & Dudnichenko, K. V. (2020). Pravove rehuliuвання utylizatsii suden [Legal regulation of ship disposal]. Prykarpatskyi yurydychnyi visnyk, 5(34), 160–165. [in Ukrainian].
7. Aleksandrovska, N., Rossomakha, O., Pizintsali, L., Rossomakha, O., Rabocha, T., & Malyshev, O. (2025). Sudnoremont ta utylizatsiia: ekolohichni vyklyky zatonulykh suden Ukrainy [Ship repair and recycling: Environmental challenges of sunken ships of Ukraine]. Visnyk Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu, 75, 122–143. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-1-122> [in Ukrainian].
8. Pizintsali, L. V. (2016). Ukraina – problemy utylizatsii morskikh suden [Ukraine – problems of ship recycling]. Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal, 7, 100–104. Retrieved November 17, 2025, from <https://cyberleninka.ru/article/n/ukraina-problemy-utilizatsii-morskih-sudov> [in Ukrainian].
9. Pizintsali, L. V., Aleksandrovska, N. I., Rossomakha, O. I., Rossomakha, O. A., & Rabocha, T. V. (2022). Analiz suchasnykh tekhnolohichnykh metodiv rizannia pry utylizatsii suden z vykorystanniam diahramy Ishikavy [Analysis of modern cutting technologies in ship recycling using Ishikawa diagrams]. InterConf Scientific Collection, 105, 430–447. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.04.2022> [in Ukrainian].
10. Pizintsali, L. V., Aleksandrovska, N. I., Rossomakha, O. I., Nikiforov, Yu. A., Shakhov, V. I., & Rabocha, T. V. (2020). Pryntsypy formuvannia systemy ekolohichnoho menedzhmentu pidpriemstva z utylizatsii morskikh suden [Principles of forming an environmental management system for ship recycling enterprises]. Vodnyi transport, 1(29), 83–96. <https://doi.org/10.33298/2226-8553/2020.1.29.10> [in Ukrainian].

11. Pizintsali, L., Aleksandrovska, N., & Nikiforov, Yu. (2020). Intehrovana systema menedzhmentu – osnova stvorennia proektu utylizatsiinoho pidpriemstva [Integrated management system as a basis for creating a ship recycling enterprise]. *Visnyk ONMU*, 58(1), 207–225. Retrieved November 17, 2025, from <http://visnyk.onmu.odessa.ua/index.php/1/article/view/19> [in Ukrainian].
12. Pizintsali, L. V., Aleksandrovska, N. I., & Varbanets, R. A. (2015). Vybir tekhnolohichnoho protsesu utylizatsii korpusu sudna metodom ekspertnykh otsinok [Selecting the technological process of hull recycling using expert evaluation]. *Visnyk AGTU. Morska tekhnika i tekhnolohiia*, 1, 14–20. [in Ukrainian].
13. Pizintsali, L. V. (2015). Dotsilnist stvorennia utylizatsiinoho pidpriemstva na bazi sudnoremontnoho zavodu [Feasibility of establishing a ship recycling enterprise at a ship repair yard]. *Visnyk ONMU*, 4(46), 170–183. [in Ukrainian].
14. Pizintsali, L. V. (2015). Pidhotovka “zelenoho pasporta” yak protsedury mizhnarodnykh vymoh do orhanizatsii utylizatsiinykh pidpriemstv [Preparation of the “green passport” as an international requirement for ship recycling enterprises]. *Visnyk ONMU*, 2(44), 177–185. [in Ukrainian].
15. Rossomakha, O. I., Aleksandrovska, N. I., Pizintsali, L. V., Rossomakha, O. A., Rabocha, T. V., & Malyshekin, O. V. (2024). Zavod z utylizatsii suden: chy potriben vin Ukraini? [Ship recycling plant: Does Ukraine need it?]. *Nauka i tekhnika sohodni*, 3(31), 953–974. [in Ukrainian].
16. Mohiuddin, M. G., Hossain, B. A., & Islam, M. S. (2023). Analysis of present global ship recycling status and challenges for Bangladesh. *Global Scientific Journal*, 11(4). Retrieved November 17, 2025, from <https://www.globalscientificjournal.com>
17. GMK Center. (2025). Kytai do 2025 roku maie namir narostyty potuzhnosti z... [China intends to increase ship recycling capacity by 2025]. Retrieved November 17, 2025, from <https://gmk.center> [in Ukrainian].
18. GMK Center. (2025). Zapasy sudnovoho bruktu v Ukraini siahaiut 1.2 mln t [Ukraine's ship scrap reserves reach 1.2 million tons]. Retrieved November 17, 2025, from <https://gmk.center/ua/posts/vodni-resursi-zapasi-sudnovogo-bruktu-v-ukraini-syagajut-1-2-mln-t> [in Ukrainian].
19. GMK Center. (2025). Svystaty vsykh na verf: sytuatsiia na rynku utylizatsii suden zahostruietsia [Situation in the ship recycling market is escalating]. Retrieved November 17, 2025, from <https://gmk.center/ua/posts/svistati-vsih-na-verf-situaciya-na-rynku-utilizacii-suden-zagostruietsia> [in Ukrainian].
20. Pizintsali, L. V. (2021). Metodolohichni osnovy orhanizatsiino-tekhnolohichnykh protsesiv utylizatsii suden [Methodological foundations of ship recycling processes]. Kherson: OLDI-Plus. [in Ukrainian].
21. Paluba Media. (2024). Svitove sudnobuduvannia – pidsumky 2024 roku ta tendentsii 2025 roku [Global shipbuilding – results of 2024 and trends of 2025]. Retrieved November 17, 2025, from <https://paluba.media/news> [in Ukrainian].
22. Paluba Media. (2025). Svitove sudnobuduvannia za pershu polovynu 2025 roku [Global shipbuilding in the first half of 2025]. Retrieved November 17, 2025, from <https://paluba.media/news/200677> [in Ukrainian].
23. Euroshiny. (2025). Svitovyi flot u 2025 rotsi: upovilnennia zrostantia i... [World fleet in 2025: slowing growth]. Retrieved November 17, 2025, from <https://euroshiny.com.ua> [in Ukrainian].
24. Ukrainian Shipping Magazine. (n.d.). Honkonhaska konventsiiia pro utylizatsiiu suden... [Hong Kong Convention on ship recycling]. Retrieved November 17, 2025, from <https://usm.media> [in Ukrainian].
25. Science for Environment Policy. (n.d.). Ship recycling: Reducing human and environmental impacts. Retrieved November 17, 2025, from https://ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/ship_recycling_reducing_human_and_environmental_impacts_55si_en.pdf
26. European Union. (2020). Commission Implementing Decision (EU) 2020/1675. Retrieved November 17, 2025, from <https://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32020D1675>
27. Verkhovna Rada Ukrainy. (2015). Pro litsenzuvannia vydiv hospodarskoi diialnosti [On licensing of economic activities]. Retrieved November 17, 2025, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/222-19> [in Ukrainian].
28. Verkhovna Rada Ukrainy. (1999). Pro metalobrukht [On scrap metal]. Retrieved November 17, 2025, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/619-14> [in Ukrainian].
29. Shipregister.ua. (n.d.). Nabula chynnosti Konventsiiia pro ekolohichnu utylizatsiiu suden [Convention on environmentally sound ship recycling entered into force]. Retrieved November 17, 2025, from <https://shipregister.ua> [in Ukrainian].
30. International Maritime Organization. (2003). IMO Guidelines on Ship Recycling (Resolution A.962(23)). Retrieved November 17, 2025, from http://rise.odessa.ua/texts/A962_23_03.php3

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 19.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

О. В. АНДРОНОВА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-9597-8068

В. В. КУРАК

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-4303-5671

МОДЕЛЮВАННЯ НЕПОКРИТОГО ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛОВОГО КОЛЕКТОРА В MATLAB/SIMULINK

Сполучення фотоелектричного модуля та сонячного теплового колектора в фотоелектричний тепловий (PVT) колектор дозволяє реалізувати принцип когенерації і, тим самим, підвищити ефективність перетворення сонячного випромінювання в теплову та електричну енергію. Питання оптимізації конструкцій і режимів експлуатації таких колекторів вимагає проведення моделювання.

В роботі запропонована імітаційна модель непокритого фотоелектричного теплового колектора, реалізована в програмному середовищі Matlab/Simulink. Розроблена еквівалентна теплова схема колектора, що описує процеси передачі теплоти від фотоелектричного модуля до рідкого теплоносія та процеси теплообміну між конструктивними елементами колектора та оточуючим середовищем. На основі теплової та електричної схем з використанням блоків Simscape створено імітаційну модель непокритого PVT колектора, яка дозволяє визначати генеровані теплову та електричну потужності, ефективності перетворення енергії, температури конструктивних елементів при стаціонарних та змінних умовах оточуючого середовища для різних режимів роботи фотоелектричного модуля.

В якості зразка обрано колектор SUNSYSTEM PVT 240, конструктивні параметри якого покладено в основу розрахунків значень блоків Simscape. Проведено моделювання випробувань колектора в стаціонарних зовнішніх умовах експлуатації. За отриманою характеристичною кривою теплопродуктивності визначено коефіцієнт тепловтрат та максимальну теплову ефективність. Порівняння цих параметрів, отриманих моделюванням, зі значеннями зі специфікації колектора показало розбіжність менше 5%. Відхилення значень електричної потужності, отриманих моделюванням при різних температурних умовах роботи, від розрахункових не перевищує 3%, що свідчить про коректність запропонованої моделі. Проведене моделювання для змінних умов експлуатації показало високу ефективність роботи непокритих PVT колекторів для кліматичних умов України.

Дана модель може бути використана для оптимізації конструкції непокритих фотоелектричних теплових колекторів, визначення режимів їх роботи для різних кліматичних умов, бути основою для обґрунтування економічної доцільності впровадження систем генерації на основі фотоелектричних теплових колекторів.

Ключові слова: непокритий фотоелектричний тепловий колектор, PVT, модель, Matlab/Simulink, ефективність, потужність, фотоелектричний модуль.

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

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

SIMULATION OF UNCOVERED PHOTOVOLTAIC THERMAL COLLECTOR IN MATLAB/SIMULINK

The combination of a photovoltaic module and a solar thermal collector into a photovoltaic thermal (PVT) collector allows implementing the principle of cogeneration and, thereby, increasing the efficiency of solar radiation conversion into thermal and electrical energy. The task for optimizing the designs and operating modes of such collectors requires modeling.

The paper proposes a simulation model of an uncovered photovoltaic thermal collector implemented in the Matlab/Simulink software. An equivalent thermal scheme of the collector representing the processes of heat transfer from the photovoltaic module to the liquid coolant and the processes of heat exchange between the structural elements of the collector and the environment has been developed. Based on the thermal and electrical schemes a simulation model of an uncovered PVT collector which allows determining the generated thermal and electrical power, energy conversion efficiency and temperature of structural elements under stationary and variable environmental conditions for different operating modes of the photovoltaic module was created using Simscape blocks.

The SUNSYSTEM PVT 240 collector was chosen as a sample, and the structural parameters of this collector were used as the basis for calculating the values of the Simscape blocks. A simulation of collector tests in stationary external operating conditions was carried out. The heat loss coefficient and maximum thermal efficiency were determined based on the obtained heat performance curve. A comparison of these parameters obtained by simulation with the values from the collector specification showed a discrepancy of less than 5%. The deviation of the electrical power values obtained by simulation under different temperature operating conditions from the calculated ones does not exceed 3% which indicates the correctness of the proposed model. The simulation for variable operating conditions showed high efficiency of uncovered PVT collectors for the Ukrainian climate.

Developed model can be used to optimize the construction of uncovered photovoltaic thermal collectors, determine their operating modes for different climatic conditions, and also be the basis for substantiating the economic feasibility of implementing generation systems based on photovoltaic thermal collectors.

Key words: *uncovered photovoltaic thermal collector, PVT, model, Matlab/Simulink, efficiency, power, photovoltaic module.*

Постановка проблеми

Фотоелектричні теплові (PVT) колектори поєднують у собі конструкції фотоелектричного модуля та сонячного теплового колектора, що дозволяє одночасно отримувати теплову та електричну енергію від одного пристрою при економії місця розташування перетворювачів. Утилізація теплоти розігріву фотоелектричного модуля за допомогою теплового колектора дозволяє підвищити ефективність перетворення сонячної енергії в електричну, а також підвищує загальний к.к.д. за рахунок когенерації.

За виконанням PVT колектори поділяються на покриті, непокриті, вакуумовані та концентруючі. В залежності від типу теплоносія, що використовується в теплових колекторах для охолодження фотоелектричних модулів, розрізняють конструкції PVT колекторів з рідинним або повітряним охолодженням [1-3]. Вироблення теплової та електричної енергії визначається конструктивними і режимними параметрами, кліматичними умовами місця розташування, тому оптимізація продуктивності і ефективності PVT колекторів являє собою складну задачу, для розв'язання якої використовують методи моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботі [4] розроблено динамічну чисельну тривимірну модель фотоелектричного теплового колектора з листово-трубним абсорбером. Розглянуто вплив нерівномірного розподілу температури по поверхні фотоелектричного перетворювача на генеровану електричну потужність, а також вплив кількості склінь та низькоемісійного покриття на теплову та електричну потужності колектора. Показано, що запропонована модель є корисним інструментом для проектування та оптимізації конструкції колектора та режимів роботи систем на його основі.

Динамічну модель непокритого фотоелектричного теплового колектора, побудовану на основі рівнянь енергетичних балансів для кожного компонента, реалізовано в програмному середовищі Matlab/Simulink [5]. Модель дозволяє визначати температурні режими роботи, потужність та ефективність генерації теплової та електричної енергії протягом року для режиму роботи модуля у точці максимальної потужності. Досліджено вплив товщини теплоізоляції та витрати теплоносія на ефективність перетворення сонячної енергії. Показано перспективність використання даної моделі для аналізу енергетичних показників фотоелектричних теплових колекторів.

Для визначення економічної ефективності систем на основі PVT колекторів в середовищі Matlab/Simulink розроблено модель, що базується на рівняннях теплопродуктивності теплового колектора та вироблення електричної енергії фотоелектричним модулем, ефективність якого є функцією температури [6]. Досліджено вплив оптичного ккд та щільності розташування сонячних елементів у модулі на теплову та електричну ефективність фотоелектричного теплового колектора.

Запропоновано імітаційну модель покритого фотоелектричного теплового колектора в середовищі Matlab/Simulink, побудовану на основі електричних, теплових та гідравлічних блоків Simscape [7]. Модель використовує аналітичне розв'язання диференціальних рівнянь енергетичного балансу першого порядку для компонентів PVT колектора для визначення процесів теплопередачі в системі «оточуюче середовище – скляне

покриття – фотоелектричний модуль – пластина абсорбера – канал з теплоносієм – теплоізоляція – оточуюче середовище». Перевагами моделі є врахування зміни оптичних властивостей прозорого покриття в залежності від кута падіння сонячної радіації, однак, в моделі не реалізовано режим максимальної потужності для фотоелектричного модуля, що унеможливило визначення паспортних параметрів колектора. Проведене порівняння експериментально отриманих значень для системи на основі PVT колектора із результатами моделювання показало розбіжність, що не перевищує 5%. В роботі [8] дану модель використано для визначення впливу надходження сонячної радіації та температури оточуючого середовища на теплову та електричну продуктивності та ефективності колектора. Досліджено температурні умови роботи та тепловтрати з тильної та фронтальної поверхонь колектора в оточуюче середовище. Авторами роботи [9] перевірено коректність даної моделі шляхом порівняння експериментально отриманих даних для подібних колекторів з результатами моделювання. Отримано залежності температури теплоносія від температури фотоелектричного модуля, а також зміни останньої в залежності від надходження сонячної радіації, які дозволяють оцінити вироблення енергії колектором для кліматичних умов Кенії.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є створення на основі блоків Simscape імітаційної моделі непокритого фотоелектричного теплового колектора, яка б дозволяла досліджувати енергетичні параметри колектора в режимі максимальної потужності фотоелектричного перетворювача при змінних умовах експлуатації.

Викладення основного матеріалу дослідження

Більшість непокритих PVT колекторів виготовляються на основі стандартних фотоелектричних модулів шляхом додавання системи тепловідводу, виконаної у вигляді плоского сонячного колектора, тобто абсорбера з каналами для теплоносія, розміщених у шарі теплоізоляції (рис. 1). З'єднання теплової та електричної компонент відбувається або через шар теплопровідного клею або методом механічного притискання, останній варіант зменшує вартість, але й ефективність тепловідводу від фотоелектричного модуля є нижчою.

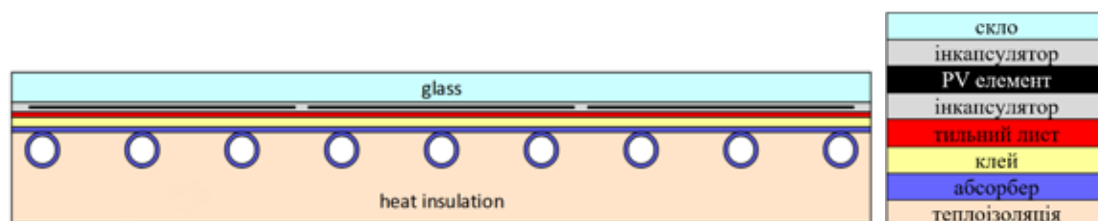


Рис. 1. Принципова схема типового непокритого фотоелектричного теплового колектора з рідинним охолодженням [1]

Фотоелектричний модуль у складі PVT колектора розглядається як послідовно з'єднані сонячні елементи, для опису яких використовується однодіодна еквівалентна схема: сонячний елемент розглядається як комбінація паралельно включених джерела струму, діода та шунтуючого опору R_{sh} , послідовно до яких підключено опір R_s . Світлова вольт-амперна характеристика реального сонячного елемента у відповідності до однодіодної еквівалентної схеми запишеться експоненціальним рівнянням з п'ятьма параметрами: струм насичення діода I_0 , послідовний R_s та шунтуючий R_{sh} опори, коефіцієнт якості p-n переходу A та фотострум I_ϕ , пропорційний сонячному випромінюванню, що надходить на поверхню елемента:

$$I = I_\phi - I_0 \left[\exp \left(\frac{e(U + IR_s)}{AkT} \right) - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}}. \quad (1)$$

Створення моделі теплової компоненти колектора в програмному середовищі Matlab/Simulink базується на еквівалентній тепловій схемі, яка описує процеси передачі теплоти від фотоелектричного модуля до теплоносія в каналах теплового колектора, а також тепловтрати з фронтальної та тильної поверхні PVT колектора в оточуюче середовище (рис. 2).

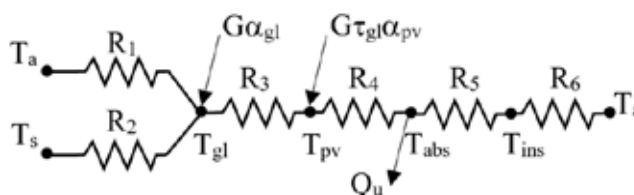


Рис. 2. Еквівалентна теплова схема колектора

При розрахунку надходжень тепла від сонячної радіації G враховано кількість теплоти, поглинутої скляним покриттям $G_{\alpha_{gl}}$ та фотоселектричним модулем $G_{\tau_{gl}\alpha_{pv}}$. Частина теплоти використовується корисно для нагріву теплоносія Q_w , а частина втрачається в оточуюче середовище.

Втрати енергії через верхню поверхню колектора враховуються двома термічними опорами: конвекції R_1 та випромінювання R_2 . Опір передачі теплоти від верхнього шару скла до навколишнього середовища R_1 обернено пропорційний коефіцієнту конвективної тепловіддачі h_c , який визначається з урахуванням швидкості вітру v над колектором з емпіричного рівняння [5]:

$$h_c = 2,8 + 3,0v. \quad (1)$$

Нагріта фронтальна поверхня колектора втрачає тепло шляхом випромінювання до небозводу, що має температуру T_s :

$$T_s = 0,0522T_a^{1,5}, \quad (2)$$

де T_a – температура оточуючого середовища.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням:

$$\frac{1}{R_s} = h_r = \varepsilon_{gl} \sigma (T_{gl}^2 + T_s^2) (T_{gl} + T_s), \quad (3)$$

де ε_{gl} і T_{gl} – відповідно ступінь чорноти та температура скляного ламінату; σ – стала Стефана-Больцмана.

При визначенні тепловтрат з тильної поверхні враховано тільки конвекцію R_6 , оскільки радіаційними тепловтратами можна знехтувати через близькість температур тильної поверхні ізоляції T_{ins} та зовнішнього повітря T_a .

Термічні опори R_3 , R_4 та R_5 визначаються властивостями матеріалів шарів конструкції колектора: інкапсулятора, фотоелектричного перетворювача, клею, абсорбера, тильної теплоізоляції:

$$R = \sum \delta_i / \lambda_i, \quad (4)$$

де δ_i – товщина шару конструкції, λ_i – коефіцієнт теплопровідності.

Розроблена в програмі Matlab/Simulink модель непокритого фотоелектричного теплового колектора представлена на рис. 3.

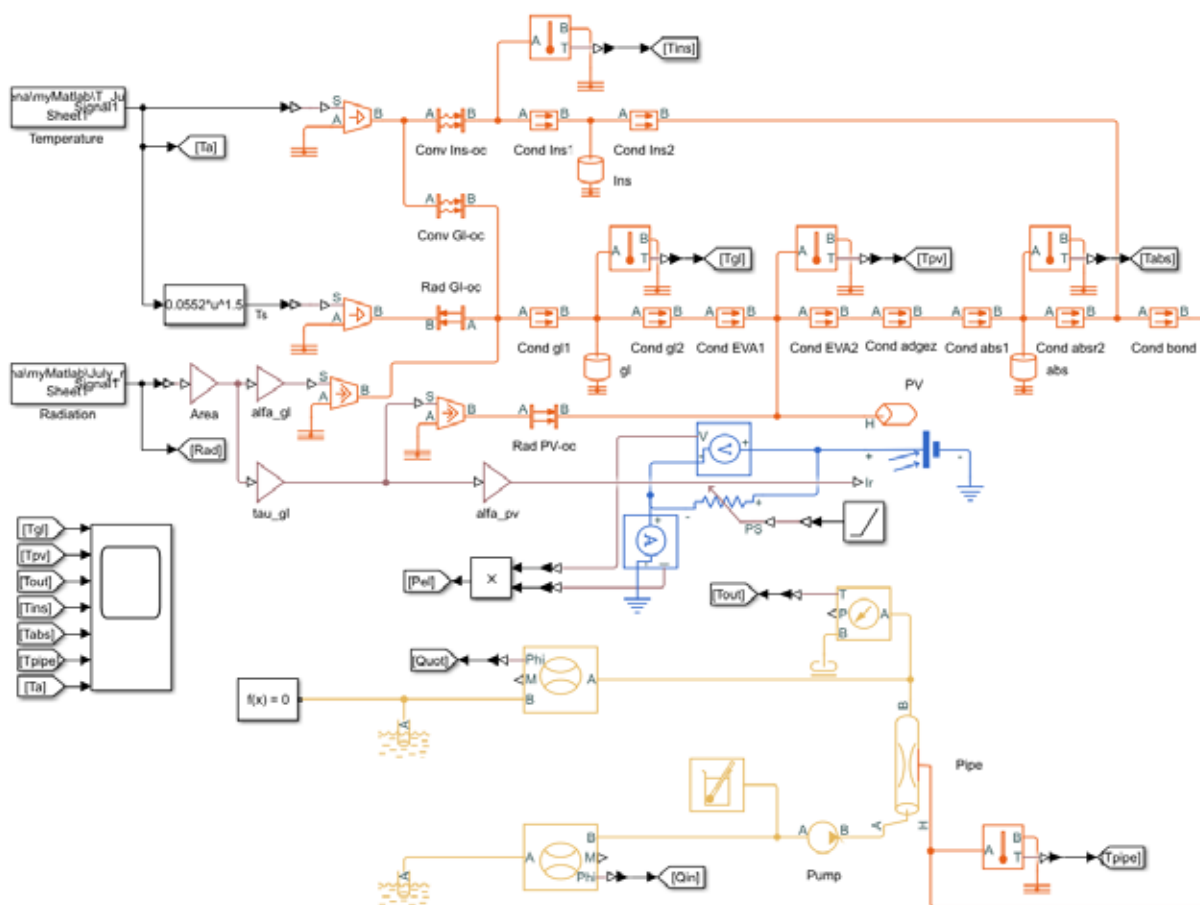


Рис. 3. Модель фотоэлектричного теплового колектора

В якості досліджуваного зразка обрано непокритий колектор SUNSYSTEM PVT 240, виконаний на основі полікристалічного кремнієвого фотоелектричного модуля, параметри якого представлено у табл. 1. Розмір PVT колектора становить 1650×990×40 мм. Абсорбер виконано з алюмінієвого листа товщиною 200 мкм, канали для теплоносія – з мідних труб діаметром 15 мм сумарною довжиною 9,3 м, тильна ізоляція із жорсткого пінополіуретану товщиною 20 мм.

Таблиця 1

Електричні параметри колектора SUNSYSTEM PVT 240

Параметр	Значення
Кількість елементів / розміри елемента	60 / 156×156 мм
Максимальна потужність	240 Вт
Напруга в точці максимальної потужності	30,6 В
Струм в точці максимальної потужності	7,84 А
Напруга холостого ходу	37,2 В
Струм короткого замикання	8,52 А
Ефективність модуля	14,7%
Температурний коефіцієнт потужності	-0,45 %/°C

Фотоелектричний модуль в розробленій моделі задано блоком Solar Cell як ланцюг послідовно з'єднаних 60 сонячних елементів. В якості навантаження обрано резистор змінного опору, що дозволяє визначити параметри колектора в режимі максимальної електричної потужності, при якому забезпечується мінімальний розігрів модуля.

Проведено моделювання випробувань фотоелектричного теплового колектора SUNSYSTEM PVT 240 при густині потоку сонячної радіації 1000 Вт/м², швидкості вітру 0 м/с, температурі оточуючого середовища 25°C, витраті теплоносія (пропілен-гліколева суміш) 0,02 кг/(с·м²). Температура теплоносія на вході в колектор задавалася на 10, 30 та 50°C вищою за температуру оточуючого середовища. Максимальна теплова ефективність та коефіцієнти тепловтрат визначалися за характеристичною кривою продуктивності теплового колектора Q_u для стаціонарних умов випробувань:

$$\frac{Q_u}{A} = G\eta_0 - a_1(T_m - T_a) - a_2(T_m - T_a)^2, \quad (5)$$

де A – загальна площа сонячного колектора; η_0 – максимальна теплова ефективність; a_1 та a_2 – лінійний та квадратичний коефіцієнти тепловтрат; T_m – середня температура рідини в колекторі.

Результати моделювання випробувань представлено у табл. 2. Порівняння отриманих результатів із тепловими параметрами зі специфікації колектора SUNSYSTEM PVT 240 показує відхилення менше 5%. Відхилення значень електричної потужності від розрахованих за температурою фотоелектричного модуля не перевищувало 3%, що свідчить про коректність запропонованої моделі.

Таблиця 2

Теплові параметри PVT колектора

Параметр	Моделювання	Специфікація	Відхилення
Максимальна теплова ефективність	0,533	0,559	4,6%
Лінійний коефіцієнт тепловтрат, Вт/(м ² ·K)	9,53	9,13	4,5%
Номінальна теплова потужність, Вт	871	900	3,2%

Проведено моделювання роботи PVT колектора впродовж характерного дня липня для кліматичних умов м. Херсон. Надходження сонячної радіації на нахилу під кутом 30° поверхню розраховано з використанням даних НАСА [10], погодинний розподіл температур прийнято згідно ДСТУ Б А.2.2-12:2015. На основі отриманої залежності оптимального опору навантаження від інтенсивності сонячної радіації забезпечено режим максимальної електричної потужності фотоелектричного модуля.

Генерація електрики PVT колектором відбувається протягом світлового дня, тоді як генерація теплової енергії починається через 1 год 36 хв після сходу Сонця, що пов'язано з необхідністю прогріву колектора (рис. 4, а). Кількість генерованої теплової енергії та теплова ефективність PVT колектора більші у другій половині світлового дня (рис. 4, б), що пояснюється більш високими температурами зовнішнього повітря T_a (рис. 4, в), тобто зменшеними тепловтратами в оточуюче середовище. Максимальна ефективність теплового перетворення становить 63,55 %, а максимальна теплова потужність за даних умов експлуатації 723 Вт (рис. 4, а).

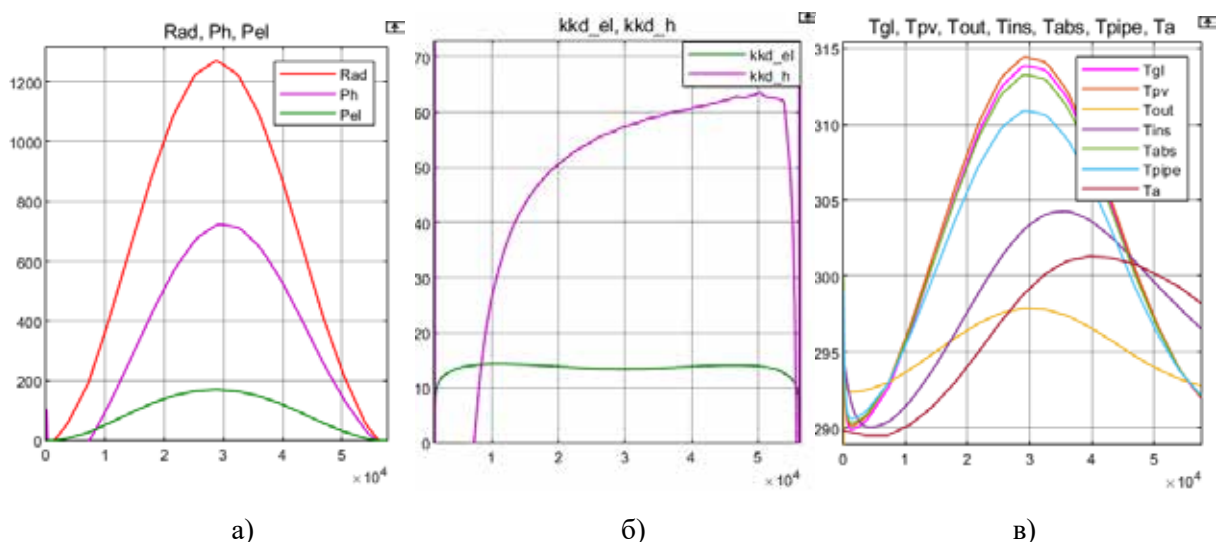


Рис. 4. Моделювання роботи фотоелектричного теплового колектора для умов характерного дня липня

Наявність системи охолодження дозволяє підтримувати температуру фотоелектричного модуля меншою 42°C (рис. 4, в). Підвищення температури модуля в біляполуденні години призводить до зменшення ефективності з $14,35\%$ до $13,38\%$ (рис. 4, б). Загальна ефективність перетворення сонячного випромінювання фотоелектричним тепловим колектором для характерної доби липня не перевищує $77,44\%$. Високі досяжні ефективності перетворення та потужності генерації свідчать про доцільність застосування непокритих PVT колекторів для кліматичних умов України.

Розроблена модель дозволяє визначати генеровані теплову та електричну потужності, ефективності перетворення, температури компонентів непокритого фотоелектричного теплового колектора при стаціонарних або змінних зовнішніх умовах експлуатації для різних режимів роботи фотоелектричного модуля, і, таким чином, проводити імітацію випробувань колектора та дослідження його роботи в заданих кліматичних умовах.

Висновки

На сьогодні запропоновано ряд моделей фотоелектричних теплових колекторів, частину з яких реалізовано в програмному середовищі Matlab/Simulink. Втім, до цього часу в літературних джерелах було описано лише одну створену на основі блоків Simscape імітаційну модель покритого колектора, недоліком якої є неможливість відстеження точки максимальної потужності, що знижує значення генерованої електричної енергії.

Розроблена в даній роботі імітаційна модель непокритого фотоелектричного теплового колектора на основі блоків Simscape дозволяє визначати теплову та електричну потужності, ефективності перетворення, температури компонентів колектора для заданих режимів роботи фотоелектричного модуля при стаціонарних або змінних параметрах сонячної радіації та температури оточуючого середовища, забезпечуючи роботу фотоелектричного модуля в точці максимальної потужності.

Проведено моделювання випробувань колектора SUNSYSTEM PVT 240. Відхилення отриманих теплових та електричних параметрів від паспортних не перевищує відповідно 5% та 3% , що свідчить про коректність запропонованої моделі. Моделювання роботи колектора при змінних зовнішніх умовах показало можливість застосування моделі в якості інструменту для аналізу ефективності непокритих PVT колекторів.

Список використаної літератури

1. Zenhäusern D., Bamberger E., Baggenstos A. PVT Wrap-Up. Energy systems with photovoltaic-thermal solar collectors [Electronic resource]. Institut für Solartechnik SPF, 2017. 89 p. Access mode: <https://www.ost.ch/en/details/projects/pvt-wrap-up-energy-systems-with-photovoltaic-thermal-solar-collectors-1381> (last access: 10.10.25). Title from the screen.
2. Lämmle M., Herrando M., Ryan G. Basic concepts of PVT collector technologies, applications and markets IEA SHC Task 60/Report D5 [Electronic resource]. International Energy Agency, 2020. 25 p. Access mode: <https://task60.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Task60-D5-Basic-Concepts-of-PVT-Technologies.pdf> (last access: 12.10.25). Title from the screen. DOI:10.18777/ieashc-task60-2020-0002
3. Abdullah A.L., Misha S., Tamaldin N., Rosli M.A.M., Sachit F.A. Photovoltaic Thermal /Solar (PVT) Collector (PVT) System Based on Fluid Absorber Design: A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. Vol. 48, Iss. 2. 2018. pp. 196-208.

4. Guarracino I., Mellor A., Ekins-Daukes N.J., Markides C.N. Dynamic coupled thermal-and-electrical modelling of sheet-and-tube hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collectors. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 101. 2016. pp. 778-795. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.056
5. Brahim T., Abdelati R., Jemni A. Dynamic simulation of roll bond PVT solar collector under Simulink/Matlab. *Engineering Research Express*. Vol. 6, 2024. 045340. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad8ff5>
6. Basaran K., Koç İ. Performance and Techno-Economic Analysis of a Hybrid Photovoltaic/Thermal System for Building Application in Turkey [Electronic resource]. 2021. 28 p. Access mode: <https://www.researchsquare.com/article/rs-220189/v1> (last access: 23.10.25). Title from the screen. DOI:10.21203/rs.3.rs-220189/v1
7. Grigore R.M., Vernica S.G., Popa S.E., Banu I.V. Simulation and Experimental Results for Energy Production Using Hybrid Photovoltaic Thermal Technology. *Energies*. Vol. 17, Iss. 6. 2024. 1422. <https://doi.org/10.3390/en17061422>
8. Bugała A., Arendacz A., Bugała D. Simulation analysis of a photovoltaic-thermal energy generator for residential prosumers in Matlab/Simulink. *Przegląd elektrotechniczny*. R. 100, No. 3, 2024. pp. 142–148. DOI:10.15199/48.2024.03.26
9. Ngunzi V., Njoka F., Kinyua R. Modeling, simulation and performance evaluation of a PVT system for the Kenyan manufacturing sector. *Heliyon*. Vol. 9, Iss.8. 2023. e18823. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18823>
10. Power data access viewer [Electronic resource] Access mode: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (last access: 20.10.2025). Title from the screen.

References

1. Zenhäusern D., Bamberger E., Baggenstos A. (2017) PVT Wrap-Up. Energy systems with photovoltaic-thermal solar collectors [Electronic resource]. Institut für Solartechnik SPF. 89 p. Access mode: <https://www.ost.ch/en/details/projects/pvt-wrap-up-energy-systems-with-photovoltaic-thermal-solar-collectors-1381> (last access: 10.10.25). Title from the screen.
2. Lämmle M., Herrando M., Ryan G. (2020) Basic concepts of PVT collector technologies, applications and markets IEA SHC Task 60/Report D5 [Electronic resource]. International Energy Agency. 25 p. Access mode: <https://task60.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Task60-D5-Basic-Concepts-of-PVT-Technologies.pdf> (last access: 12.10.25). Title from the screen. DOI:10.18777/ieashc-task60-2020-0002
3. Abdullah A.L., Misha S., Tamaldin N., Rosli M.A.M., Sachit F.A. (2018) Photovoltaic Thermal /Solar (PVT) Collector (PVT) System Based on Fluid Absorber Design: A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. Vol. 48, Iss. 2. pp. 196-208.
4. Guarracino I., Mellor A., Ekins-Daukes N.J., Markides C.N. (2016) Dynamic coupled thermal-and-electrical modelling of sheet-and-tube hybrid photovoltaic/thermal (PVT) collectors. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 101. pp. 778-795. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.02.056
5. Brahim T., Abdelati R., Jemni A. (2024) Dynamic simulation of roll bond PVT solar collector under Simulink/Matlab. *Engineering Research Express*. Vol. 6. 045340. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad8ff5>
6. Basaran K., Koç İ. (2021) Performance and Techno-Economic Analysis of a Hybrid Photovoltaic/Thermal System for Building Application in Turkey [Electronic resource]. 28 p. Access mode: <https://www.researchsquare.com/article/rs-220189/v1> (last access: 23.10.25). Title from the screen. DOI:10.21203/rs.3.rs-220189/v1
7. Grigore R.M., Vernica S.G., Popa S.E., Banu I.V. (2024) Simulation and Experimental Results for Energy Production Using Hybrid Photovoltaic Thermal Technology. *Energies*. Vol. 17, Iss. 6. 1422. <https://doi.org/10.3390/en17061422>
8. Bugała A., Arendacz A., Bugała D. (2024). Simulation analysis of a photovoltaic-thermal energy generator for residential prosumers in Matlab/Simulink. *Przegląd elektrotechniczny*. R. 100, No. 3. pp. 142–148. DOI:10.15199/48.2024.03.26
9. Ngunzi V., Njoka F., Kinyua R. (2023) Modeling, simulation and performance evaluation of a PVT system for the Kenyan manufacturing sector. *Heliyon*. Vol. 9, Iss.8. e18823. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18823>
10. Power data access viewer [Electronic resource] Access mode: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (last access: 20.10.2025). Title from the screen.

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.11.2025
 Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 16.12.2025
 Дата публікації: 31.12.2025

В. О. БАХМАЧ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технології жирів, хімічних технологій харчових добавок
та косметичних засобів
Національний університет харчових технологій
ORCID: 0000-0002-5157-9150

Т. Т. НОСЕНКО

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри технології жирів, хімічних технологій харчових добавок
та косметичних засобів
Національний університет харчових технологій
ORCID: 0000-0002-1758-4669

О. С. КЛИМЕНКО

кандидат ветеринарних наук, доцент,
доцент кафедри нормальної і патологічної анатомії та фізіології тварин
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0009-0004-9149-0304

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПІНОУТВОРЮЮЧИХ МИЙНИХ ЗАСОБІВ КЛІНОЛЛ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ВІДКРИТИХ ПОВЕРХОНЬ

У статті наведено результати комплексного дослідження фізико-хімічних характеристик піноутворюючих мийних засобів серії Клінолл, що застосовуються для очищення відкритих поверхонь від органічних та неорганічних забруднень у харчовій та аграрній галузі. Дослідження охоплювало визначення ключових параметрів, які визначають ефективність засобів: рН, в'язкість, поверхневий натяг та піноутворювальну здатність. Встановлено, що зразок Клінолл ЛПР із рН 12,8 та високою в'язкістю (7520 спз) ефективно видаляє органічні забруднення, зокрема жирові відкладення, білкові залишки та олійні плями. Висока в'язкість забезпечує тривале утримання засобу на вертикальних поверхнях, що підвищує його практичне використання. Зразок Клінолл КПР із рН 0,77 та низькою в'язкістю (810 спз) показав високу результативність у видаленні мінеральних відкладень, вапняного нальоту та іржі, що робить його придатним для застосування у виробничих умовах із жорсткою водою.

Дослідження поверхневого натягу підтвердило здатність обох засобів значно знижувати σ при збільшенні концентрації, що корелює з максимальною мийною здатністю. Вивчення піноутворювальної здатності методом Росс-Майлса показало, що обидва засоби формують стабільну піну з високою стійкістю (понад 80 % протягом 10 хвилин). Для Клінолл ЛПР максимальна піноутворювальна здатність досягалася при концентрації 5 %, тоді як для Клінолл КПР — у діапазоні 7–10 %. Висока кратність піни (2,14–3,00) підтверджує економічність використання засобів та їх здатність ефективно контактувати з поверхнею.

Отримані результати дозволяють рекомендувати засоби серії Клінолл для широкого застосування у харчовій та аграрній промисловості з метою забезпечення санітарної безпеки, зниження ризику мікробного забруднення та підвищення якості очищення виробничих поверхонь. Практичне значення дослідження полягає у визначенні оптимальних концентрацій використання: 5–7 % для Клінолл ЛПР та 7–10 % для Клінолл КПР, що забезпечує максимальну ефективність при мінімальних витратах.

Ключові слова: мийні засоби, поверхнево-активні речовини, піноутворювальна здатність, оптимізація, поверхневий натяг, рН, в'язкість, очищення поверхонь, Клінолл, органічні забруднення, мінеральні відкладення,

V. O. BAKHMACH

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Fat Technology, Chemical Technologies
of Food Additives and Cosmetic Products
National University of Food Technologies
ORCID: 0000-0002-5157-9150

T. T. NOSENKO

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Fat Technology, Chemical Technologies
of Food Additives and Cosmetic Products
National University of Food Technologies
ORCID: 0000-0002-1758-4669

O. S. KLYMENKO

PhD in Veterinary Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Normal and Pathological Anatomy
and Physiology of Animals
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0009-0004-9149-0304

INVESTIGATION OF PROPERTIES AND OPTIMIZATION OF PERFORMANCE OF KLINOLL FOAMING CLEANING AGENTS FOR OPEN SURFACES

The article presents the results of a comprehensive study of the physicochemical characteristics of foaming detergents of the Klinoll series, designed for cleaning open surfaces from both organic and inorganic contaminants in food and agricultural industries. The research focused on determining the key parameters that define detergent efficiency: pH, viscosity, surface tension, and foaming ability. It was established that Klinoll LPR, with a pH of 12.8 and high viscosity (7520 spz), effectively removes organic contaminants such as fat deposits, protein residues, and oily stains. Its high viscosity ensures prolonged retention on vertical surfaces, enhancing cleaning performance. In contrast, Klinoll KPR, with a pH of 0.77 and low viscosity (810 spz), demonstrated strong effectiveness in removing mineral deposits, lime scale, and rust, making it suitable for use in environments with hard water.

Surface tension studies confirmed that both detergents significantly reduce σ with increasing concentration, correlating with maximum cleaning capacity. Foaming ability tests using the Ross-Miles method showed that both detergents generate stable foam with high durability (over 80% after 10 minutes). For Klinoll LPR, maximum foaming ability was observed at 5% concentration, while for Klinoll KPR it was achieved in the range of 7–10%. High foam multiplicity values (2.14–3.00) further confirm the economic efficiency of these detergents and their ability to maintain effective contact with contaminated surfaces.

The obtained results allow recommending Klinoll detergents for wide application in food and agricultural industries to ensure sanitary safety, reduce microbial contamination risks, and improve the quality of surface cleaning. The practical significance of the study lies in determining optimal working concentrations: 5–7% for Klinoll LPR and 7–10% for Klinoll KPR, which provide maximum efficiency with minimal consumption.

Key words: detergents; surfactants; foaming ability; surface tension; pH; viscosity; surface cleaning; Klinoll; organic contaminants; mineral deposits

Постановка проблеми

Сучасні вимоги до санітарної безпеки харчових виробництв та аграрних підприємств потребують використання ефективних мийних засобів, здатних видаляти органічні та неорганічні забруднення з різних відкритих поверхонь [1–3]. Проблема полягає у виборі оптимальних засобів із урахуванням їх фізико-хімічних властивостей, що визначають ефективність очищення та дезінфекцію. Завданням дослідження є оцінка властивостей піноутворюючих мийних засобів серії Клінолл та визначення їх оптимальних концентрацій для практичного застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Миючі засоби видаляють забруднення з очищувальних поверхонь кількома механізмам [4]. В літературі наведено чотири основні механізми видалення забруднень: відшаровування, емульгування, пенетрація (формування ламелярних емульсій) та солюбілізація.

Відшаровування жирових забруднень відбувається легко від гідрофільних поверхонь. Адсорбція детергенту на поверхні та на жировому забрудненні призводить до збільшення кута контакту забруднення на межі розділу жир-вода-поверхня. Коли трифазний кут контакту наближається до 180 градусів, результуюча міжфазна сила, що утримує забруднення на поверхні, долається натягом змочування забруднення та поверхні, покритих детергентом, жирове забруднення відшаровується у вигляді краплі, яка відривається від поверхні при легкому перемішуванні. [5]

Емульгування жирових забруднень відбувається, коли поверхні є відносно гідрофобними, а адсорбція детергенту на межі розділу жир-вода відбувається легко, що призводить до низького міжфазного натягу. Низький міжфазний натяг сприяє розширенню межі розділення жир-вода у водну фазу та утворенню жирових крапель і емульгуванню. [6]

Пенетрація відбувається у випадку полярних жирових забруднень за температур, вищих їх критичної температури розчинення. Якщо детергент дифундує в олію в достатній концентрації, забруднення можуть стати частиною самоорганізованої мезоморфної фази, такої як ламелярна фаза. Водні шари є невід'ємною частиною цих самоорганізованих систем детергентів. Відштовхування між бішарами отриманої пластинчастої фази призводить до її набухання та відриву. Потім нова порція мийного розчину проникає крізь оголену поверхню, і процес повторюється. Витіснені жирові забруднення перетворюються на емульсію, стабілізовану пластинчастою фазою. Механізм пенетрації особливо корисний у регіонах з жорсткою водою, де аніонні поверхнево-активні речовини утворюють коацерватні фази у присутності солей кальцію.

Солюбілізація – є процесом включення водонерозчинних забруднень (гідрофобної речовини) у внутрішнє гідрофобне ядро міцел, утворених молекулами детергентів.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є узагальнення отриманих результатів дослідження ефективності піноутворюючих мийних засобів серії Клінолл, що використовуються для обробки відкритих поверхонь від різних видів забруднень.

Викладення основного матеріалу дослідження

Визначення рН мийних засобів є важливим для вибору засобу для конкретного виду очищення та безпечного використання. При виборі засобів для очищення слід враховувати тип забруднення, поверхню, що очищується, та необхідну ступінь очищення [3].

Лужні засоби ефективно видаляють жирові забруднення, білки та органічні речовини. Вони розчиняють жири, а також допомагають розкласти білки, що робить їх незамінними в місцях, де є жирові забруднення. Лужні мийні засоби рекомендуються для видалення забруднень: жирові відкладення, олійні плями, забруднення білкового походження.

Кислотні засоби рекомендуються для видалення забруднень: вапняний наліт, іржу, мінеральні відкладення. Вони розчиняють мінеральні осади, кальцій та магній, а також справляються з іржею [3].

Результати досліджень значень рН мийних засобів Клінолл наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Значення рН для дослідних зразків мийних засобів Клінолл

Зразок	Значення рН
Клінолл ЛПР	12,82
Клінолл КПР	0,77

Аналіз отриманих даних свідчить, що рН миючого засобу Клінолл КПР низький і відповідають кислотним засобам та може бути рекомендованим для видалення вапняного нальоту, окалини, іржі та мінеральних відкладень.

Миючий засіб Клінолл ЛПР має високе значення рН, що відповідає лужним засобам і може бути рекомендованим для видалення органічних забруднень з поверхонь.

Також можна констатувати, що сильно лужні та сильно кислі миючі засоби будуть ефективно видаляти мікроорганізми з очищувальних поверхонь.

Визначення та регулювання в'язкості мийних засобів важливе з декількох причин: насамперед миючі засоби з високою в'язкістю легше дозувати, що є більш економічно. Також в'язкість сприяє стабільності складу мийних засобу та покращує його якість. Мийні засоби з високою в'язкістю можуть краще контактувати з забрудненнями, що покращує їх здатність видаляти забруднення (за умови обробки відкритих поверхонь).

Результати визначення в'язкості мийних засобів Клінолл наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

В'язкість дослідних зразків мийних засобів Клінолл

Зразок мийного засобу	В'язкість, спз
Клінолл ЛПР	7520
Клінолл КПР	810

Аналіз отриманих даних свідчить, що зразок мийних засобів Клінолл ЛПР має дуже високе значення в'язкості та може бути ефективно використовуватись для миття відкритих поверхонь. Кислотний зразок Клінолл КПР має надзвичайно низьку в'язкість.

Було досліджено також залежність поверхневого натягу водних розчинів від концентрації ПАР зразків мийних засобів Клінолл.

Поверхнево-інертивні речовини концентруються переважно в об'ємі розчинника, тобто для них спостерігається від'ємна адсорбція. Розчинність цих речовин висока, поверхневий натяг в них більший від коефіцієнту поверхневого натягу розчинника. До поверхнево-інертивних за відношенням до води належать всі неорганічні електроліти (кислоти, луги, солі). Молекули цих речовин не мають гідрофобних груп і легко дисоціюють у воді на іони, які добре гідратуються.

Поверхневий натяг рідини залежить від концентрації ПАР. Із зростанням концентрації спочатку поверхневий натяг розчину різко спадає. Це зумовлено тим, що при малих концентраціях ПАР їх молекули практично повністю зосереджуються в поверхневому шарі і зменшують σ . Поступове заповнення поверхневого шару молекулами ПАР гальмує їх подальшу адсорбцію, що призводить до сповільнення падіння поверхневого натягу, а при утворенні мономолекулярного шару σ не залежить від зростання концентрації ПАР.

Вивчаючи будову поверхневих плівок, Д. Релей, І. Ленгмюр, Н. К.Адам показали, що положення адсорбованих молекул ПАР в поверхневому шарі залежить від концентрації. При низьких концентраціях молекули ПАР розташовані переважно горизонтально з досить сильною взаємодією полярних і неполярних груп з молекулами води. З ростом концентрації ПАР утворюється більш щільна упаковка молекул, при якій полярні групи орієнтовані до води, а неполярні вуглеводневі радикали нахилені, при насиченні – розміщені вертикально («частокіл» Ленгмюра). Адсорбція ПАР на межі фаз "розчин-повітря" може бути описана ізотермою адсорбції Ленгмюра. Досліджуючи поверхневий натяг водних розчинів органічних речовин, Траубе встановив закономірність: в будь-якому гомологічному ряду при малих концентраціях подовження вуглецевого ланцюга на CH_2 -групу збільшує поверхневу активність у 3-3,5 рази (також його називають правилом «Дюкло – Траубе»).

За отриманими даними значень поверхневого натягу розчинів мийних засобів Клінолл будували ізотерми $\sigma = f(C)$ для всіх розчинів мийних засобів (рис.1). Аналіз отриманих даних свідчить, що збільшення концентрації мийного розчину до 1,0 % суттєво зменшує поверхневий натяг водних розчинів. Мінімальні значення поверхневого натягу розчинів досліджуваних ПАР корелюють із максимальною мийною здатністю розчинів, що свідчить про високу мийну здатність досліджуваних ПАР.

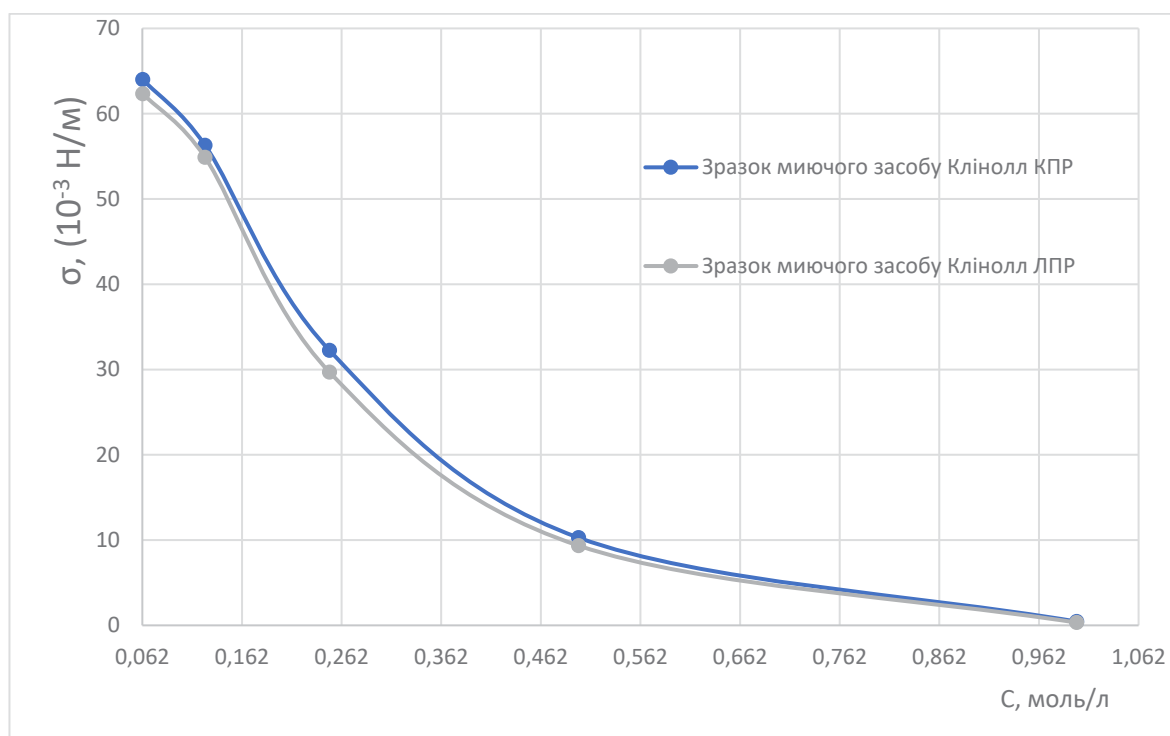


Рис. 1. Ізотерми водних розчинів зразків мийних засобів Клінолл

Визначення піноутворювальної здатності мийних засобів Клінолл проводили методом Росс-Майлса. При використанні даного методу утворення піни відбувається в результаті вільного падіння струменя водного розчину ПАР у водний розчин тієї ж самої ПАР.

Результати вимірювання піноутворювальної здатності вихідних мийних засобів (рис. 2, 4) свідчать, що Клінолл ЛПР та КПР мають високу піноутворювальну здатність та високу стійкість піни. Піноутворювальну здатність виражають початковою висотою стовпчика піни- H_0 , мм та стійкістю піни - $H_5/H_0 \cdot 100\%$.

Отримані результати дають можливість оцінити кратність піни: відношення об'єму піни V_p до об'єму розчину $V_{ж}$, що витрачено на її утворення:

$$B = \frac{V_p}{V_{ж}},$$

де V_p – об'єм піни в умовах вимірювання H_0 , см³;

об'єм $V_{ж}$ – різниця між 250 см³ й об'ємом рідини під час вимірювання V_p .

Зразки мийного засобу Клінолл КПР та ЛПР мають високе значення кратності утвореної піни.

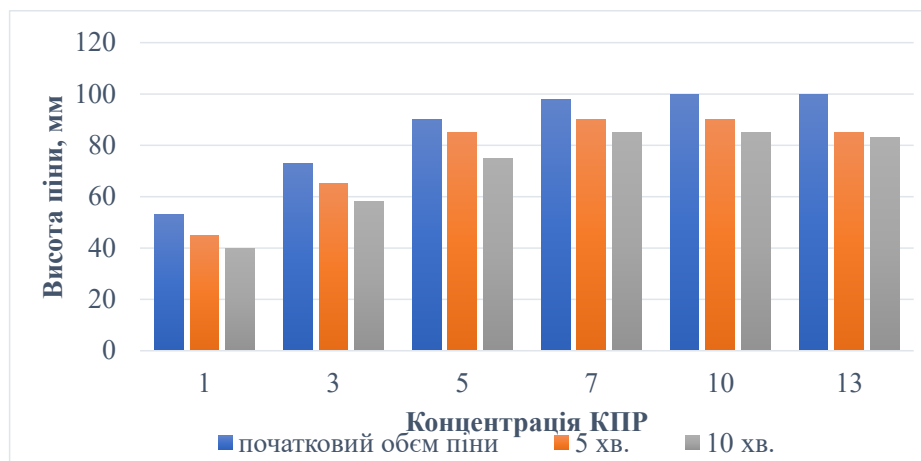


Рис. 2. Піноутворювальна здатність водних розчинів мийного засобу Клінолл КПП

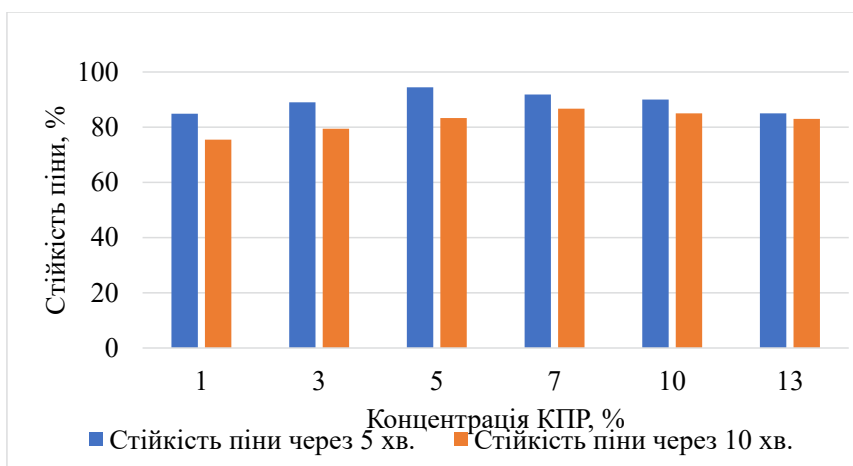


Рис. 3. Стійкість піни водних розчинів мийного засобу Клінолл КПП

Піноутворювальна здатність водних розчинів мийного засобу Клінолл ЛПП була максимальною при концентрації 5 %, при підвищенні його концентрації до 7 і 10 % дещо зменшувалась (рис. 4).

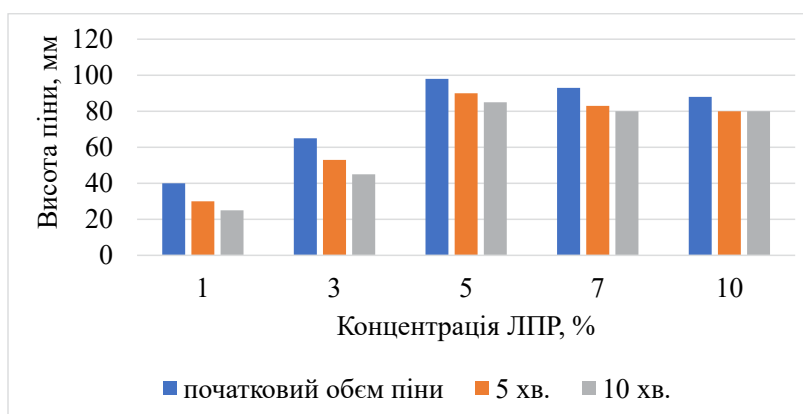


Рис. 4. Піноутворювальна здатність водних розчинів мийного засобу Клінолл ЛПП

Стійкість піни водних розчинів мийного засобу Клінолл ЛПП була низькою при низьких концентраціях. За концентрації 5-10 % стійкість піни зростала і становила 86-91 % (рис. 5).

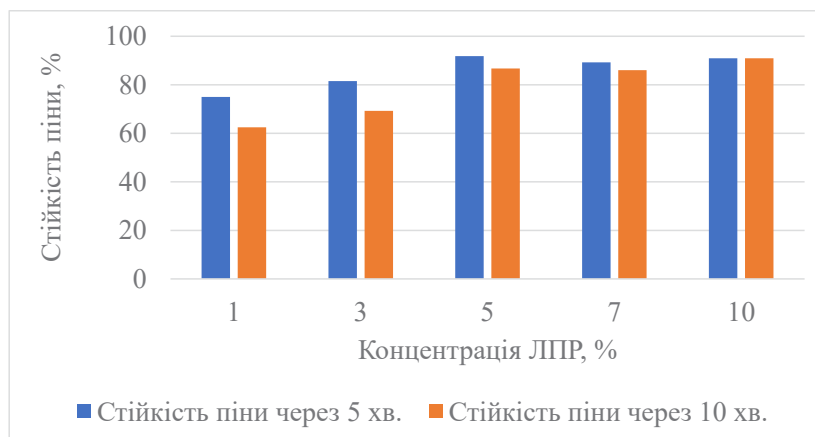


Рис. 5. Стійкість піни водних розчинів мийного засобу Клінолл ЛПР

Висновки

В результаті проведеної роботи встановлено, що мийний засіб Клінолл ЛПР із значенням рН 12,8 та високою в'язкістю має високу ефективність для очищення відкритих поверхонь від органічних забруднень, включаючи жирові забруднення. Високе значення рН також зумовлює дезинфікуючу дію даного засобу. Висока в'язкість даного засобу та його розчинів зумовлює його ефективне використання для вертикальних поверхонь. Ефективна концентрація мийного засобу Клінолл ЛПР для очищення відкритих поверхонь становить 5-7 %.

Встановлено, що мийний засіб Клінолл КПР із значенням рН 0,77 та низькою в'язкістю має високу ефективність для очищення відкритих поверхонь від неорганічних забруднень, включаючи забруднення солями жорсткості та вапняні нашарування. Висока кислотність даного засобу зумовлює дезинфікуючу дію. Рекомендована концентрація для миття відкритих поверхонь - 7-10 %.

Список використаної літератури

1. Lochhead R.Y. Basic Physical Sciences for the Formulation of Cosmetic Product. In Cosmetic Science and Technology: Theoretical Principles and Applications; Sakamoto, K., Lochhead, R.Y., Maibach, H.I., Yamashita, Y., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2017; pp. 373–388.
2. Pugh R.J. Foams and foaming. In: Holmberg K, editor. Handbook of applied colloid and surface chemistry. New York: John Wiley & Sons; 2001.
3. ДСТУ 2207.1-93 «Методи визначення концентрації водневих іонів»
4. Myers D. Physical properties of surfactants used in cosmetics. In: Rieger MM, Rhein LD, editors. Surfactants in cosmetics. New York, Basel: Marcel Dekker, Inc.; 1997 [Chapter 2].
5. Koelsch P, Motschmann H. Relating foam lamella stability and surface dilational rheology. Langmuir 2005;21:6265-9.
6. Ma B, Zhang L, BaoyuGao, Zhang L, Zhao S, Yu JY. Interfacial dilational rheological property and lamella stability of branched alkyl benzene sulfonates solutions. Colloid Polym Sci 2011;289:911-8.

References

1. Lochhead, R. Y. (2017). Basic physical sciences for the formulation of cosmetic product. In K. Sakamoto, R. Y. Lochhead, H. I. Maibach, & Y. Yamashita (Eds.), Cosmetic science and technology: Theoretical principles and applications. (pp. 373–388). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802005-0.00019-0>
2. Pugh, R. J. (2001). Foams and foaming. In K. Holmberg (Ed.), Handbook of applied colloid and surface chemistry. New York, NY: John Wiley & Sons.
3. DSTU 2207.1-93. (1993). Methods for determining the concentration of hydrogen ions. Kyiv: State Standard of Ukraine.
4. Myers, D. (1997). Physical properties of surfactants used in cosmetics. In M. M. Rieger & L. D. Rhein (Eds.), Surfactants in cosmetics (Chapter 2). New York, NY; Basel: Marcel Dekker, Inc.
5. Koelsch, P., & Motschmann, H. (2005). Relating foam lamella stability and surface dilational rheology. Langmuir, 21(14), 6265–6269. <https://doi.org/10.1021/la050316z>
6. Ma, B., Zhang, L., Gao, B., Zhang, L., Zhao, S., & Yu, J. Y. (2011). Interfacial dilational rheological property and lamella stability of branched alkyl benzene sulfonates solutions. Colloid and Polymer Science, 289(9), 911–918. <https://doi.org/10.1007/s00396-011-2427-0>

Дата першого надходження рукопису до видання: 16.11.2025
 Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025
 Дата публікації: 31.12.2025

С. В. БІГУН

аспірант кафедри експлуатація суднового електрообладнання
і засобів автоматики

Херсонська державна морська академія

ORCID: 0009-0007-6385-3296

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЗМАЩЕННЯ ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВОЇ ГРУПИ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ МАСТИЛ З НИЗЬКИМ ВМІСТОМ ЛУЖНОСТІ

Стаття присвячена вирішенню актуальної науково-технічної проблеми підвищення ефективності та надійності систем автоматичного керування процесом упорскування циліндрового мастила у суднових малооборотних двигунах внутрішнього згоряння при використанні мастил із низьким рівнем лужності. Аналіз експлуатації існуючих систем імпульсного змащення, зокрема Alpha Lubricator виробництва MAN Energy Solutions, виявив низку критичних проблем при роботі з низьколужними мастилами. Серед них: підвищена частота відмов індуктивних датчиків зворотного зв'язку, недостатня живучість системи керування при виході з ладу окремих компонентів, а також труднощі з формуванням стабільної мастильної плівки через знижену в'язкість мастила при робочих температурах циліндрової втулки. Усе це призводить до зростання ризиків аварійних режимів, скорочення ресурсу циліндро-поршневої групи та зниження загальної готовності суднової енергетичної установки. Метою дослідження є розробка та експериментальна апробація адаптивної системи автоматичного керування процесом упорскування циліндрового мастила, яка реалізує два режими роботи та алгоритм прогнозуючого керування. Запропоновано метод адаптивного керування з автоматичним перемиканням режимів залежно від умов експлуатації та динамічною корекцією температури охолодження циліндрової втулки. Для забезпечення безперервності функціонування системи розроблено алгоритм резервування на основі статистичного аналізу попередніх циклів роботи, що дозволяє підтримувати точність дозування мастила на рівні $\pm 8\%$ навіть у випадку відмови індуктивних датчиків зворотного зв'язку. Експериментальна перевірка підтвердила ефективність запропонованої системи. Запропоноване технічне рішення забезпечує підвищення надійності та живучості системи змащення, зменшення експлуатаційних ризиків і продовження ресурсу циліндро-поршневої групи суднових малооборотних двигунів. Отримані результати мають практичне значення для модернізації суднових енергетичних установок у контексті глобального переходу на екологічно чисті палива та сприяють підвищенню безпеки й економічності морських перевезень.

Ключові слова: система змащення, циліндрове мастило, низька лужність, Alpha Lubricator, адаптивне керування, живучість системи, прогнозує керування, суднові двигуни, автоматизація.

S. V. BIHUN

Postgraduate Student at the Department of Operation of Ship Electrical Equipment
and Automation

Kherson State Maritime Academy

ORCID: 0009-0007-6385-3296

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE CYLINDER-PISTON GROUP LUBRICATION SYSTEM OF MARINE ENGINES WHEN USING OILS WITH LOW ALKALINITY CONTENT

The article addresses a pressing scientific and technical problem of improving the efficiency and reliability of automatic control systems for cylinder oil injection in low-speed marine diesel engines when operating with lubricants of low alkalinity. An analysis of the operation of existing pulse lubrication systems, in particular the Alpha Lubricator manufactured by MAN Energy Solutions, revealed a number of critical issues when using low-alkaline oils. These include: increased failure rates of inductive feedback sensors, insufficient resilience of the control system in the event of component malfunctions, and difficulties in forming a stable lubricating film due to reduced oil viscosity at the operating temperatures of the cylinder liner. All these factors lead to higher risks of emergency modes, reduced service life of the cylinder-piston assembly, and decreased overall availability of the ship's power plant.

The aim of the study is the development and experimental validation of an adaptive automatic control system for cylinder oil injection, implementing two operating modes and a predictive control algorithm. A method of adaptive control with automatic switching between modes depending on operating conditions and dynamic correction of cylinder liner

cooling temperature is proposed. To ensure continuous system operation, a redundancy algorithm based on statistical analysis of previous operating cycles has been developed, enabling oil dosing accuracy within $\pm 8\%$ even in the event of inductive sensor failures.

Experimental verification confirmed the effectiveness of the proposed system. The technical solution ensures increased reliability and resilience of the lubrication system, reduction of operational risks, and extension of the service life of the cylinder–piston assembly of low-speed marine engines. The obtained results have practical significance for the modernization of ship power plants in the context of the global transition to environmentally friendly fuels and contribute to enhancing the safety and cost-effectiveness of maritime transport.

Key words: lubrication system, cylinder oil, low alkalinity, Alpha Lubricator, adaptive control, system resilience, predictive control, marine engines, automation.

Постановка проблеми

У 2020 році Міжнародна морська організація (ІМО) запровадила глобальне обмеження вмісту сірки в судновому паливі до 0,5% m/m, що стало радикальним зниженням порівняно з попереднім лімітом 3,5%. Це регуляторне рішення, спрямоване на зменшення викидів SOx та твердих частинок, суттєво змінило вимоги до систем змащення циліндро-поршневої групи малооборотних судових двигунів.

Традиційно для нейтралізації кислотних продуктів згоряння високосірчистих палив застосовувалися мастила з високим лужним числом (BN 70–100 мг КОН/г). Використання низькосірчистих палив ($<0,5\%$ S) зробило надлишок лужних присадок небажаним, оскільки він спричиняє утворення лакових відкладень, полірування втулки та підвищений знос кілець. Це зумовило перехід на мастила з низьким BN (20–40 мг КОН/г).

Однак експлуатація LOW BN мастил виявила низку критичних недоліків існуючих систем автоматичного керування змащенням. За даними світового флоту 2020–2023 років, системи Alpha Lubricator демонструють зростання частоти відмов індуктивних датчиків зворотного зв'язку – з 1–2 до 8–12 випадків на місяць на циліндр.

Ще однією проблемою є формування стабільної мастильної плівки. В'язкість LOW BN мастил (22–26 сСт при 100 °C) є нижчою за HIGH BN (28–32 сСт), що при стандартній температурі втулки 180–185 °C зменшує товщину плівки з 3,2–3,8 до 2,4–3,0 мкм і створює ризик граничного змащення та задирів.

Первопричиною цих проблем є відсутність адаптації алгоритмів Alpha Lubricator до специфіки LOW BN мастил, зокрема їх температурної чутливості та особливостей процесу упорскування. Тому актуальним завданням є розробка адаптивної системи автоматичного керування, здатної забезпечити ефективну роботу двигунів на LOW BN мастилах при високій надійності та живучості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Адаптація систем змащення циліндро-поршневої групи (ЦПГ) до мастил із низьким лужним числом (LOW BN) є предметом активних досліджень останніх п'яти років. Умовно наукові роботи можна поділити на три напрями: вивчення трибологічних характеристик LOW BN мастил, удосконалення механічних компонентів систем змащення та розробку алгоритмів керування.

Комплексне дослідження [2] показало, що при зниженні вмісту сірки в паливі нижче 0,5% оптимальне лужне число мастила становить 25–40 мг КОН/г. Експерименти на двигуні MAN B&W 6S50MC підтвердили, що зниження температури втулки на 8–12 °C дозволяє компенсувати меншу в'язкість LOW BN мастил [7]. Також встановлено, що для таких мастил оптимальний тиск упорскування має бути на 5–10% вищим порівняно з HIGH BN [8].

Виробники двигунів запропонували низку рішень. Wärtsilä у системі RT-flex CLU-4 реалізувала концепцію «pulse jet» із вісьмома точками упорскування замість чотирьох [9]. MAN Energy Solutions у Service Letter SL2020-694 рекомендувала зниження базової витрати мастила з 1,0–1,2 до 0,8–1,0 г/кВт·год при переході на LOW BN [1]. Проте такі рішення потребують значних капіталовкладень і не усувають проблеми живучості систем керування.

Відомі також системи довготермінового моніторингу параметрів двигуна на основі веб-технологій [10] та інтелектуальні системи моніторингу енергоспоживання з елементами прогнозування [11]. Однак вони зосереджені на аналізі трендів, а не на активному керуванні процесом змащення.

Питання живучості систем при відмові датчиків досліджено в [12], де доведено ефективність методів аналітичного резервування. У працях [13, 14] розглянуто стандартизацію систем моніторингу судового обладнання та запропоновано архітектуру з резервуванням критичних каналів вимірювання. Імітаційне моделювання [15] підтвердило, що ключовими параметрами оптимізації є температура втулки, тиск упорскування та закон зміни витрати залежно від навантаження. У роботі [16] запропоновано концепцію системи з двома режимами (LOW BN MODE та HIGH BN MODE) та багатокритеріальну оптимізацію з обмеженнями на знос втулки й витрату мастила.

Попри значну кількість досліджень, комплексного рішення досі немає. Воно має одночасно забезпечувати адаптацію параметрів керування до типу мастила, живучість системи при відмові датчиків, можливість модернізації без заміни механічних компонентів та підтвердження ефективності у реальних умовах експлуатації.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є розробка та експериментальна апробація адаптивної системи автоматичного керування процесом упорскування циліндрового мастила у суднових малооборотних двигунах внутрішнього згоряння, яка забезпечує ефективну роботу при використанні мастил із низьким рівнем лужності.

Викладення основного матеріалу дослідження

Об'єктом дослідження виступає система автоматичного керування процесом упорскування циліндрового мастила у суднових малооборотних двигунах внутрішнього згоряння, зокрема Alpha Lubricator System 707X-40C виробництва MAN Energy Solutions.

Система змащення циліндро-поршневої групи реалізована у вигляді Alpha Lubricator 707X-40C, що працює за принципом імпульсного упорскування під високим тиском. Кожен циліндр обладнано двома лубрикаторами та чотирма точками впорскування, розташованими діаметрально протилежно на різних рівнях втулки. Форсунки встановлені на відстані 30 мм та 80 мм нижче верхньої мертвої точки, а тиск упорскування сягає 200 бар. Робочий діапазон витрати мастила становить 0.6–1.4 г/кВт·год на циліндр. Система оснащена акумуляторами високого та низького тиску, індуктивними датчиками зворотного зв'язку та керуючими блоками MCU і BCU з функцією автоматичного резервування.

Охолодження циліндрових втулок здійснюється у замкненому контурі прісноводної системи з номінальною температурою води на вході 36 °C та на виході 50–55 °C. Температурний режим регулюється термостатичним клапаном у діапазоні 40–60 °C, а контроль здійснюється за допомогою датчиків, розташованих у чотирьох зонах втулки. Система керування двигуном належить до типу ME-C, що передбачає електронне управління, використання системи Common Rail для паливоподачі та електрогідравлічний привід випускних клапанів. Вона інтегрована у суднову мережу через протокол Modbus TCP/IP та оснащена діагностичним комплексом MAN PrimeServ Diagnostic із можливістю віддаленого доступу.

На рис. 1 представлено структурну схему розробленої модернізованої адаптивної системи автоматичного керування процесом упорскування циліндрового мастила, яка реалізує тривірневу ієрархічну архітектуру з інтеграцією елементів інтелектуального керування на основі нечіткої логіки.

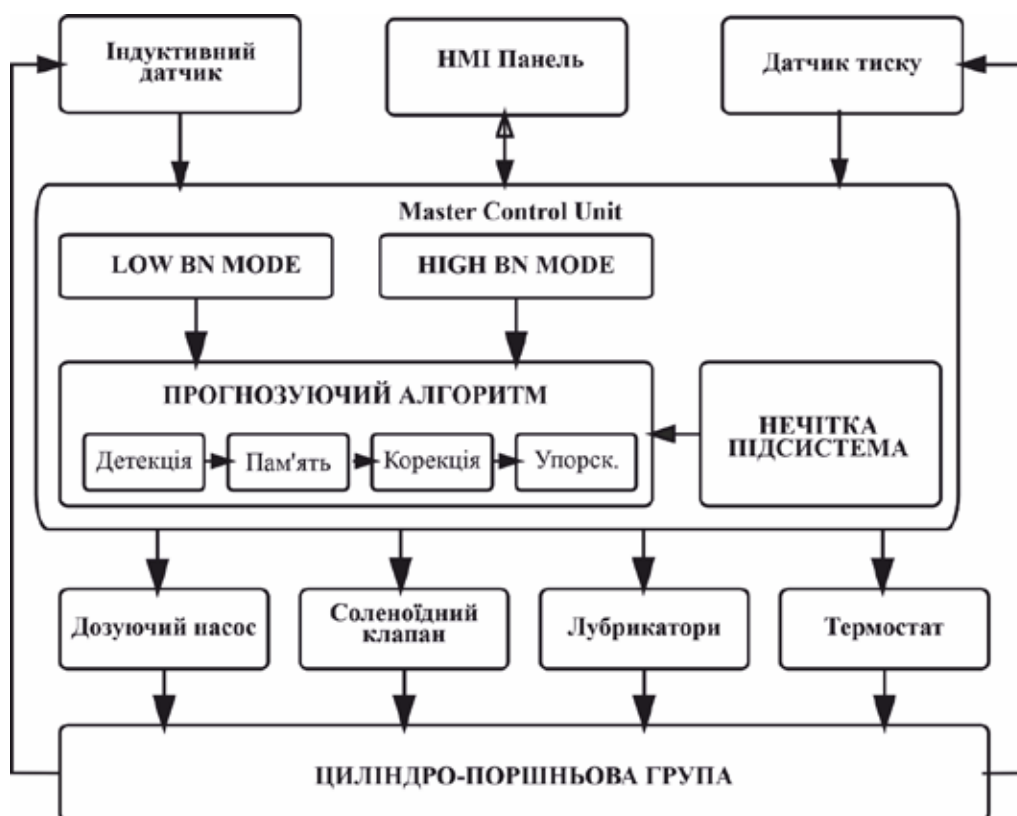


Рис. 1. Структурна схема адаптивної системи автоматичного керування процесом упорскування циліндрового мастила

Запропонована система побудована за принципом функціональної декомпозиції з виділенням трьох незалежних, але взаємопов'язаних рівнів: апаратного, автоматичного керування та інтелектуального керування. Така архітектура забезпечує модульність системи, що дозволяє проводити поетапну модернізацію існуючих установок Alpha Lubricator без необхідності повної заміни обладнання, а також спрощує діагностику та усунення несправностей завдяки чіткому розподілу функцій між рівнями.

Апаратний рівень складається з трьох основних компонентів вимірювальної та інтерфейсної апаратури. Датчики Balluff BES 516-326-E4-C-S49 призначені для верифікації факту спрацювання лубрикаторів шляхом індуктивної детекції переміщення штока виконавчого механізму.

HMI панель Siemens SIMATIC KTP700 Basic забезпечує інтерфейс оператора для введення параметрів мастила, моніторингу поточного стану системи, перегляду активних та історичних тривог, а також ручного перемикачання між режимами роботи.

Датчик тиску WIKA S-20 (діапазон 0-250 бар) є додатковим елементом, відсутнім в базовій конфігурації Alpha Lubricator. Його інтеграція дозволяє реалізувати функцію аналітичного резервування, коли при відмові датчика тиск може бути оцінений розрахунковим шляхом на основі вимірюваної витрати мастила, температури та кількості активних лубрикаторів, що підвищує живучість системи.

Центральним елементом системи керування є MCU (Master Control Unit), в запропонованій системі його функціональність розширена шляхом впровадження двох режимів роботи, що адаптують параметри керування до типу використовуваного мастила:

- Режим LOW BN MODE автоматично активується при введенні оператором через HMI панель значення лужного числа мастила $BN < 50$ мг КОН/г.
- Режим HIGH BN MODE активується при $BN \geq 50$ мг КОН/г і використовує стандартні параметри керування, рекомендовані виробником для високолузних мастил.

Третій рівень керування активується лише у випадку відмови датчика зворотного зв'язку. Замість переходу системи в режим обмеженої функціональності або зупинки, запускається прогнозуючий алгоритм, що дозволяє продовжити роботу без підтвердження факту упорскування. Алгоритм складається з чотирьох етапів: детекція відмови за трьома пропущеними циклами (3–5 с), активація буфера пам'яті з даними останніх 100 циклів, розрахунок середнього часу спрацювання t_{avg} , корекція цього часу на поточні умови (температура, тиск, навантаження) та генерація команди на упорскування з точністю $\pm 8\%$.

Ключовою інновацією є інтеграція нечіткої підсистеми, яка оцінює коефіцієнти корекції k_{temp} , k_{press} та k_{load} на основі нечіткої логіки. Вхідними параметрами є відхилення температури мастила, тиску та навантаження двигуна. Використання нечіткої логіки дозволяє врахувати невизначеність і нелінійні ефекти при екстремальних умовах, що підвищує гнучкість системи.

Команди від рівня керування передаються до виконавчих механізмів: дозуючого насоса змінного об'єму, який створює тиск до 200 бар і синхронізується з обертанням колінчастого валу; соленоїдного клапана, що швидко розподіляє потік мастила (час спрацювання 10–15 мс); лубрикаторів, які впорскують мастило через форсунки у втулку; та термостатичного клапана, що регулює температуру охолоджуючої води. При активації LOW BN MODE температура втулки знижується на 10–11 °C протягом 1,5–2 годин.

Об'єктом керування є циліндро-поршнева група двигуна MAN B&W 6S50ME-C9.5 із шістьма циліндрами діаметром 500 мм та потужністю 9,480 кВт. Всі виконавчі механізми формують замкнений контур керування завдяки трьом каналам зворотного зв'язку: від лубрикаторів, до HMI панелі та до датчика тиску. Це забезпечує MCU актуальною інформацією про стан системи та дозволяє своєчасно коригувати роботу.

Представлена трирівнева архітектура має низку переваг порівняно з традиційними одно- чи дворівневими системами. Модульна організація дозволяє модернізувати окремі рівні незалежно, чітко розділення функцій спрощує діагностику, а використання нечіткої логіки забезпечує адаптивність до непередбачених умов експлуатації. Це особливо важливо для суднових установок, які працюють у складних умовах із обмеженими можливостями технічного обслуговування під час рейсу. Результати статистичного аналізу сигналів тривоги системи змашення наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Статистика сигналів тривоги системи Alpha Lubricator за етапами випробувань

Тип сигналу тривоги	Етап 1 (HIGH BN, базова)	Етап 2 (LOW BN, базова)	Етап 3 (LOW BN, модерніз.)	Покращення, %
Feedback Sensor Failure (ALR 1-24)	4	23	3	87.0
Oil Pressure Low (ALR 39)	2	8	2	75.0
Oil Temperature High (ALR 38)	1	12	2	83.3
Speed Deviation Alarm (ALR 40)	3	5	3	40.0
BCU Takeover Events	0	6	1	83.3
Загальна кількість	10	54	11	79.6

Як видно з таблиці, після впровадження модернізованої системи загальна кількість сигналів тривоги знизилася на 79,6%, що підтверджує ефективність запропонованих технічних рішень у забезпеченні надійності системи змащення при використанні мастил із низьким рівнем лужності.

Окрім кількісних показників, було зафіксовано суттєве покращення часу реагування системи на критичні ситуації. На основі даних про всі зареєстровані відмови та час їх усунення протягом трьох етапів випробувань розраховано інтегральні показники надійності системи (табл. 2).

Таблиця 2

Показники надійності системи автоматичного керування

Показник	Базова система	Модернізована система	Покращення
Середній час між критичними відмовами, що вимагають втручання (MTBF), годин	320	1850	×5,8
Середній час відновлення після відмови (MTTR), годин	4,5	0,4	×11,3
Коефіцієнт готовності MTBF / (MTBF + MTTR)	0,946	0,993	+5,0%
Стійкість до одиночних відмов	Ні	Так	–
Стійкість до подвійних відмов	Ні	Частково	–

Збільшення MTBF у 5,8 разів (з 320 до 1850 годин) є найбільш значущим показником підвищення надійності. Це означає, що якщо в базовій системі критична відмова, що вимагає зупинки двигуна або втручання персоналу, відбувалася в середньому кожні 13 днів роботи, то в модернізованій системі інтервал між такими подіями збільшився до 77 днів, тобто приблизно 2,5 місяці безперервної роботи.

Висновки

У проведеному дослідженні розроблено та експериментально апробовано адаптивну систему автоматичного керування процесом упорскування циліндрового мастила для суднових малооборотних двигунів внутрішнього згоряння. Запропоноване рішення забезпечує стабільну роботу при використанні мастил із низьким рівнем лужності (BN 20–40), зберігаючи високі показники надійності та живучості. Система реалізує метод адаптивного керування з автоматичним перемиканням режимів (LOW BN MODE / HIGH BN MODE), що включає динамічну корекцію температури охолодження циліндрової втулки. Зниження температури на 10 °C у режимі LOW BN MODE сприяє підвищенню в'язкості мастила на 18–22% та формуванню мастильної плівки товщиною 3,5–4,2 мкм, що є співставним із показниками режиму HIGH BN.

Важливим елементом системи став алгоритм прогнозуючого керування, побудований на статистичному аналізі попередніх ста циклів роботи. Він забезпечує безперервність функціонування навіть у випадку відмови індуктивних датчиків зворотного зв'язку, підтримуючи точність дозування мастила в межах ±8%. Це підвищує живучість системи при одночасній відмові до двох компонентів. Експериментальні дослідження підтвердили суттєве зростання показників надійності: кількість сигналів тривоги зменшено майже на 80%, середній час між відмовами збільшено у 5,8 раза, а коефіцієнт готовності підвищено з 94,6% до 99,3%.

Морські випробування тривалістю 2 840 годин показали, що знос циліндрової втулки при роботі на мастилах із низьким BN становить 0,027 мм/1000 год, що відповідає показникам експлуатації на традиційних високолужних мастилах і водночас є на 41% кращим порівняно з базовою системою на LOW BN. Економічний ефект від впровадження системи полягає у зниженні витрат на циліндрове мастило на 28,3% (з 3 680 до 2 640 USD/1000 год для двигуна потужністю 9 480 кВт), при одночасному збереженні технічного стану циліндро-поршневої групи та скороченні кількості незапланованих зупинок із 8,5 до 0,5 год/1000 год роботи.

Отримані результати підтверджують, що розроблена система є ефективним інструментом підвищення надійності та економічності суднових енергетичних установок у контексті глобального переходу на екологічно чисті палива. Подальші дослідження доцільно спрямувати на випробування системи на двигунах інших типів (Wärtsilä RT-flex, Winterthur X-series), вивчення довготривалого впливу на ресурс циліндро-поршневої групи (12 000–20 000 годин роботи), застосування методів машинного навчання та нечіткої логіки для інтелектуалізації алгоритмів керування, а також інтеграцію системи у концепцію «цифрового двійника» суднового двигуна для прогнозової діагностики.

Список використаної літератури

1. Cylinder lubrication update for 0 to 0.50% sulphur fuels: Service Letter SL2019-671/JUSV. Copenhagen: MAN Energy Solutions, 2019. 7 p.
2. Cylinder and System Oils MAN B&W Low-Speed Two-Stroke Engines: Service Letter SL2020-694/JUSV. Copenhagen: MAN Energy Solutions, 2020. 12 p.
3. Guidelines for Diesel Engine Lubrication – Impact of Low Sulphur Fuel on Lubrication of Marine Engines: CIMAC Recommendation No. 26 / CIMAC Working Group «Marine Lubricants». [S. l.]: CIMAC, 2014. 43 p.

4. Tadros M., Ventura M., Guedes Soares C. Optimization of the Performance of Marine Diesel Engines to Minimize the Formation of SOx Emissions. *Journal of Marine Science and Application*. 2020. Vol. 19. P. 473–484. DOI: 10.1007/s11804-020-00156-0.
5. Marine engine lubrication after 2020: White Paper / Alfa Laval. 2018. 12 p. URL: <https://www.alfalaval.com>.
6. Base Number (BN) Technical Bulletin / Chevron Marine Products. 2020. 8 p. URL: <https://www.chevronmarineproducts.com>.
7. Бігун С. В., Сіманенков А. Л., Лебеденко Ю. О. Імітаційна модель системи керування процесом упорскування циліндрового мастила суднових двигунів. *Суднові енергетичні установки: наук.-техн. зб. Одеса: НУ «ОМА»*, 2023. Вип. 48. С. 78–92.
8. Бігун С. В., Сіманенков А. Л., Лебеденко Ю. О. Задача оптимального керування процесом упорскування циліндрового мастила суднових двигунів. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування (СЕУТТО-2024): матеріали 15-ї Міжнар. наук.-практ. конф. Херсон: ХДМА*, 2024. С. 93–94.
9. RT-flex Low-Speed Engines: Cylinder Lubrication System Description: Technical Documentation / Wärtsilä Corporation. [S. l.], 2021. 45 p.
10. Design and experimental development of a new electronically controlled cylinder lubrication system for low-speed marine diesel engines / Z. He et al. *International Journal of Engine Research*. 2019. Vol. 20, iss. 10. P. 1029–1041. DOI: 10.1177/1468087419833072.
11. Rules for Classification of Ships. Part 4, Chapter 2: Propulsion, power generation and auxiliary systems / DNV GL. [S. l.]: DNV GL, 2020. 156 p.
12. Інтелектуальна інформаційно-вимірювальна система діагностики та моніторингу гібридного суднового турбокомпресора з нечіткою моделлю / Ю. О. Лебеденко та ін. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2025. Т. 1, № 30. С. 45–58. DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.031-044.
13. Sun Z., Shen Z., Li X. Experimental study on influence factors of atomization performance of air-blast lubricator. *Journal of Central South University (Science and Technology)*. 2018. Vol. 49, iss. 3. P. 600–605. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2018.03.012.
14. Guidelines for Diesel Engines Lubrication Oil Degradation: CIMAC Recommendation No. 22 / CIMAC Working Group. [S. l.]: CIMAC, 2004. 68 p.
15. Alpha Lubricator System Operation Manual MC Engines: Document No. 707X-40C. Copenhagen: MAN Diesel & Turbo, 2008. 72 p.

References

1. MAN Energy Solutions. (2019). Cylinder lubrication update for 0 to 0.50% sulphur fuels (Service Letter SL2019-671/JUSV).
2. MAN Energy Solutions. (2020). Cylinder and system oils MAN B&W low-speed two-stroke engines (Service Letter SL2020-694/JUSV).
3. CIMAC Working Group "Marine Lubricants". (2014). Guidelines for diesel engine lubrication – Impact of low sulphur fuel on lubrication of marine engines (CIMAC Recommendation No. 26). CIMAC.
4. Tadros, M., Ventura, M., & Guedes Soares, C. (2020). Optimization of the performance of marine diesel engines to minimize the formation of SOx emissions. *Journal of Marine Science and Application*, 19, 473–484. <https://doi.org/10.1007/s11804-020-00156-0>
5. Alfa Laval. (2018, November). Marine engine lubrication after 2020 [White paper]. <https://www.alfalaval.com>
6. Chevron Marine Products. (2020). Base Number (BN) technical bulletin. <https://www.chevronmarineproducts.com>
7. Bihun, S. V., Simanenkova, A. L., & Lebedenko, Yu. O. (2023). Imitatsiina model systemy keruvannia protsesom uporskuvannia tsylindrovoho mastyla sudnovykh dyvnyhnyv. *Sudnovi enerhetychni ustanovky*, 48, 78–92.
8. Bihun, S. V., Simanenkova, A. L., & Lebedenko, Yu. O. (2024). Zadacha optymalnoho keruvannia protsesom uporskuvannia tsylindrovoho mastyla sudnovykh dyvnyhnyv. *Materialy 15-yi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Suchasni enerhetychni ustanovky na transporti, tekhnolohii ta obladnannia dlia yikh obsluhovuvannia" (SEUTTO-2024)* (pp. 93–94). KhDMA.
9. Wärtsilä Corporation. (2021). RT-flex low-speed engines: Cylinder lubrication system description [Technical Documentation].
10. He, Z., Guan, W., Lv, Y., et al. (2019). Design and experimental development of a new electronically controlled cylinder lubrication system for low-speed marine diesel engines. *International Journal of Engine Research*, 20(10), 1029–1041. <https://doi.org/10.1177/1468087419833072>
11. DNV GL. (2020). Rules for classification of ships: Part 4, Chapter 2: Propulsion, power generation and auxiliary systems.

12. Lebedenko, Yu. O., Tymofieiev, K. V., Voronenko, S. V., & Bihun, S. V. (2025). Intelktualna informatsiino-vymiriuvalna systema diahnostyky ta monitorynhu hibrydnogo sudnovoho turbokompresora z nechytkoiu modeliui. Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii, 1(30), 45–58. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.031-044>
13. Sun, Z., Shen, Z., & Li, X. (2018). Experimental study on influence factors of atomization performance of air-blast lubricator. Journal of Central South University (Science and Technology), 49(3), 600–605. <https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2018.03.012>
14. CIMAC Working Group. (2004). Guidelines for diesel engines lubrication oil degradation (CIMAC Recommendation No. 22). CIMAC.
15. MAN Diesel & Turbo. (2008). Alpha lubricator system operation manual MC engines (Document No. 707X-40C).

Дата першого надходження рукопису до видання: 20.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 17.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

І. С. БІЛЮК

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри автоматики

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ORCID: 0000-0003-1654-7468

А. В. РАЧИНСЬКИЙ

аспірант кафедри автоматики

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ORCID: 0009-0005-3726-5293

А. М. ФОМЕНКО

старший викладач кафедри автоматики

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

ORCID: 0009-0005-9163-2090

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПІВ РОБОТИ АВТОНОМНОЇ ХВИЛЬОВОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГІЄЮ ПРИБЕРЕЖНИХ ТЕРИТОРІЙ

Метою даної статті є дослідження принципів роботи автономних хвильових енергетичних установок, спрямованих на забезпечення електроенергією прибережних регіонів на середньохвильовому потенціалі. Для самодостатньої, сталої та відновлюваної енергетики важливо розвивати такі технології, особливо в районах, де доступ до центральних мереж є важким або важкодоступним. У дослідженні розглядаються всі аспекти роботи хвильової огинаючої, включаючи всі аспекти екологічної оцінки при виробництві електроенергії та щоденному аналізі розподілу. Режим хвилі заснований на класичній моделі CV енергії хвилі, класична модель хвилі до 5-6,5 метрів, а фронт – 2,5-8,3 кВт / хв. Потужність хвилі поступово зростає з кількістю хвиль поступово та з певною висотою хвилі ($H = 2$ м) на найвищому рівні при найвищому значенні. У внутрішніх морях вона має максимальне значення, що символізує режим прибережних районів. Моделювання частоти похибки частоти плаваючості показало стан високого піку, який узгоджувався з масово-інерційними характеристиками системи, одночасно ефективно поглинаючи енергію хвилі в робочому діапазоні частот. Далі механічний і електричний ККД системи ВВП становить 28-41% в залежності від хвильового навантаження і режиму роботи, а генератор розрахований на 5 кВт. Виробництво електроенергії в добовому циклі становить 80-92 кВт/год, вночі 6 кВт/год і 2,8-3,3 кВт. Базуючись на цих характеристиках, установка може забезпечувати стабільну електроенергію під буфером зберігання. Для демонстрації потенціалу малих енергетичних систем для забезпечення середньої потужності берегової інфраструктури, подальшої оптимізації проектування, удосконалення та розвитку підвищення ефективності РТО та адаптивного керування генерацією.

Ключові слова: хвильова енергетика; автономна хвильова електростанція; point absorber; хвильовий потенціал; амплітудно-частотна характеристика; система відбору потужності (РТО); резонансні коливання; гідродинамічне моделювання; добовий профіль генерації; прибережні енергосистеми.

I. S. BILIUK

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor at the Department of Automation

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

ORCID: 0000-0003-1654-7468

A. V. RACHYNSKYI

Postgraduate Student at the Department of Automation

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

ORCID: 0009-0005-3726-5293

A. M. FOMENKO

Senior Lecturer at the Department of Automation

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

ORCID: 0009-0005-9163-2090

EXPLORING THE ADVANTAGES AND LIMITATIONS OF THE FEATURE-SLICED DESIGN ARCHITECTURAL METHODOLOGY IN COMMERCIAL FRONTEND PROJECTS

The results of the study of an autonomous point-absorber wave energy converter for supplying power to low to medium wave energy potential coastal regions are the focus of this paper. This subject is relevant because there is increasing demand for self-reliant, sustainable and eco-friendly sources of energy, especially in areas with no connectivity to centralized grids. The study details all aspects of wave energy conversion, from its environmental assessment to the production of electricity and the analysis of the daily production. During the simulation phase at wave heights of 0.7–1.5 m at periods of 5–6 s, in accordance with the classical wave power density is achieved 2.5–8.3 kW/m. Wave potential increases with growing wave height in a quadratic fashion, and for $H = 2$ m the maximum achievable value is above 14 kW/m, representing typical characteristics of coastal semi-enclosed seas. Modeling within the frequency domain of buoy velocity provided a resonant maximum at about 0.20 Hz indicating that the parameters applied (mass–inertia) selected were suitable to absorb energetic wave energy at this range. The mechanical and electrical power calculations further confirm that the PTO system can achieve 28–41% efficiency depending on the wave loading and work modes, with a 5 kW generator. The daily energy output level is 80–92 kWh, reaching day peak power of approximately 6 kWh/period and night power of 2.8–3.3 kWh, as expected due to stochasticity inherent in the wave climate. Based on these conditions then, the power is stable when the power is stored in a battery-energy storage buffer system. The findings validate that compact autonomous wave energy systems are feasible to work in coastal facilities operating at moderate wave potential regions, and establish the base for additional optimization of the design of the buoy, improvement of PTO efficiency, and formulation of adaptive generation control strategies.

Key words: wave energy; autonomous wave power plant; point absorber; wave energy potential; frequency response; power take-off (PTO) system; resonance oscillations; hydrodynamic modelling; daily generation profile; coastal energy systems.

Постановка проблеми

Через зростання виробництва енергії в прибережних регіонах традиційна енергія недовикористовується, і важливо забезпечити стабільну автономну енергію, що підвищує інтерес до розвитку індустрії хвильової енергії, яка, можливо, є одним із найперспективніших секторів відновлюваної енергетики. Хвильові електростанції здатні виробляти безперервну енергію, на відміну від сонячних і вітрових електростанцій. Але це не легко реалізувати на морських узбережжях України та за їх межами, оскільки гідродинамічний процес ускладнюється низьким ступенем стандартизації конструкцій та надзвичайно чутливими технологіями до специфіки хвильового клімату. Особливо важливі автономні хвильові установки, які повинні працювати автономно без централізованої інфраструктури для їх експлуатації та забезпечувати енергією місцеві об'єкти, такі як навігаційні системи, прибережні технологічні станції, телеметричні комплекси та малі поселення. Такі проблеми є надзвичайно проблематичними; вони вимагають технічної надійності, економічного обґрунтування та екологічної стійкості автономних хвильових електростанцій, які можуть ефективно працювати за неконтрольованих змін висоти та періоду хвиль. В основі лежать міжнародні стандарти оцінки хвильової енергії (IEC 62600-101 [1]; IEC TS 62600-2 [2]; ЕМЕС [3]), але з безліччю реальних застосувань існує недостатньо або навіть, у кількох сценаріях реалістичних сценаріїв, мало методів для впровадження таких стандартів, і тому оптимізація параметрів хвильових перетворювачів, а також прогнозування їхньої продуктивності за нормальних реальних умов є надзвичайно складними. Тут необхідно знайти основну наукову роботу, щоб зрозуміти вимоги до роботи автономної хвильової електростанції, яка гарантує максимальне використання, постійну продуктивність енергії протягом добового циклу та за змінних умов хвильового клімату. Абсолютно необхідно враховувати глибше дослідження взаємодії буя та хвильового фронту, особливості частотно-амплітудного хвильового генератора, ефективність механічного перетворювача енергії (PTO) та ефективність умов добового генерування за фактичних та прогнозованих хвильових умов. Таким чином, об'єктом дослідження є оцінка гідродинамічної, структурної та енергетичної продуктивності сценаріїв, за яких автономний проект хвильової генерації здатний забезпечити стабільне електропостачання для прибережних районів, а також технічні обмеження, з якими стикаються під час експлуатації. Ця робота визначить принципи, які визначають функціонування автономного хвильового перетворювача, оцінить енергоефективність на практиці та встановить ключові параметри, які надають реалістичний погляд на ефективність автономної електростанції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогоднішній день тенденція енергетики хвиль у сучасному розвитку зосереджена на системах перетворення хвиль низької енергії та автономних системах, що забезпечують енергопостачання для локалізованих прибережних об'єктів. Дизайн поверхні, що поглинає енергію, ефективність системи перетворення механічних вібрацій, частотно-амплітудні властивості буйків та адаптація хвильового модуля щодо внутрішніх морів та захищених вод давно підкреслюються в сучасних дослідженнях. Це дослідження використовуватиме дослідження хвильових перетворювачів у внутрішніх морських середовищах, що є сильною основою цього дослідження. Результати, отримані від К. Капітанчука та М. Андрійишина [4], також проливають світло на вплив оптимізації хвильового перетворювача на локальний хвильовий клімат та орієнтацію елементів захоплення енергії, які є незамінними

для проектування автономних систем у прибережних регіонах з низькою хвильовою енергією. Аналогічно, автори представили метод оцінки параметрів малої хвильової електростанції та її гвинтоподібної поверхні на основі тієї ж концепції, що геометрія перетворювача та частотні характеристики хвильового фронту безпосередньо відповідають один одному. Цей підхід дозволяє додатково досліджувати взаємодію коливальних систем з їх хвильовими умовами, що може дозволити налаштування продуктивності автономної установки в річкових та прибережних регіонах [5]. Оглядова стаття К. Прасад та ін. [6] зосереджується на дослідженні систем РТО, що використовуються у хвильових установках, галузі, яка викликала великий науковий інтерес. Автори вказують на недоліки, присутні в класичних механічних та гідравлічних схемах приводу (важливих для проектування автономних станцій) та внесок нової гібридної системи збору хвиль-фотонної енергії для малих прибережних громад. Інтегровані гібридні рішення, здатні вирішити проблему стохастичного навантаження хвиль, будуть критичними для подолання розриву. Спеціалізовані дослідження в галузі прикладних портових енергетичних систем також проводилися, спираючись на дослідження, проведене С. Бонамано та ін. [7], і було досліджено виробництво електроенергії на установці WaveSAX в умовах порту. Спираючись на дослідження, що вивчає доцільність менших та середніх хвильових електростанцій, автори наголошують на важливості автономії та енергетичної незалежності електроенергії від портових установок. Прямий шлях – це робота, що розглядає встановлення хвильових енергетичних мереж у захищених водах. Робота Р. Каскахо та ін. [8] у секторальному дослідженні оцінювала кілька критеріїв оцінки життєздатності генерації хвиль у портах за підходом Delphi. Вони говорять про хвильовий режим, технічний стан інженерних споруд, економічну ефективність та вплив на навколишнє середовище, які є важливими для роботи автономної установки, що працює на узбережжі. Дослідження такого роду було повідомлено в літературі в різних дисциплінах: Т. Назаре та ін. [9] також залишається унікальним; воно застосовує домен кібербезпеки як фокус для системи океанічної енергії. Хоча стаття стосується інформаційної безпеки, ризики та обмеження системи, пояснені в ній, можуть бути безпосередньо застосовані до автономії хвильової платформи, типу платформи, яка потребує рішення, яких є багато, та несанкціонованих впливів, що застосовуються під час безперервної роботи хвиль у морському середовищі. Ще одна корисна стаття, яка вносить подальші наукові знання для дослідників, які розглядають ефективність установок для безпілотних хвиль, – це систематичний огляд Д. Клементе та ін. [10] щодо алгоритмів оптимізації для процесів оцінки хвильових ресурсів. Вона представляє огляд алгоритмів моделювання хвильового клімату, ідентифікації спектральної структури, прогнозування енергетичного потенціалу та налаштування перетворювача до реальних водних умов для точного оцінювання продуктивності автономних систем. Оцінка останніх статей показує, що комплексні технічні та методологічні покращення в роботі над техніками з метою покращення хвильових перетворювачів та розширення їх сфери автономної практики активно розвиваються. Деякі питання, наприклад, взаємодія буйка з хвильовим полем краще, ніж можна отримати, оптимальна продуктивність систем РТО, коли хвиля є стохастичною, та підтримка автономних станцій у середовищі на щоденній основі, потребують подальших досліджень.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є з'ясування принципів роботи автономної хвильової електростанції, а також розрахунок конструктивних і гідродинамічних параметрів, від яких залежить її здатність ефективно забезпечувати енергією прибережні райони. У цьому розділі акцентується увага на поведінці хвильового перетворювача в реальному хвильовому середовищі, ефективності передачі енергії від коливань буя до енергетичного блоку, а також на добовій динаміці виробництва електроенергії в умовах зміни хвильових умов. Послідовний аналіз ключових характеристик хвильового ресурсу, конструктивних схем перетворювача, моделювання функціонування системи «хвиля – буй – РТО» та визначення показників, від яких залежить енергетичний вихід автономної установки, є частиною дослідницьких завдань. Особлива увага приділяється оцінці того, як зміни висоти хвиль і періоду хвиль впливають на амплітуду і частоту коливань буя, кількість механічної енергії, яку може витягти система перетворення, та добове виробництво в типових прибережних умовах. Метою роботи є показати, як мала хвильова електростанція може використовуватися для живлення місцевої інфраструктури і коли вона може працювати як автономна система та забезпечувати рівень генерації енергії передбачуваним чином. Бажаним результатом є узагальнення властивостей автономного хвильового модуля, розробка науково обґрунтованих параметрів його роботи та аналіз ефективності енергії в реалістичних хвильових умовах.

Викладення основного матеріалу дослідження

Метою цієї роботи було дослідити функціонування автономного хвильового перетворювача типу поглинач, що демонструє колювання буя через хвильовий фронт і подальшу передачу енергії до системи перетворення. Така конструкція обрана, оскільки вона є операційно доцільною для внутрішніх вод з низьким хвильовим потенціалом, що характерно для прибережних регіонів, де автономні системи мають найбільше практичне значення. Робота хвильової електростанції не розглядається як окремий коливальний фактор, а скоріше як інтегрований процес дії – від ініціації хвильового потоку до генерації електроенергії та передачі до локальної мікромережі. Оцінка потенціалу хвильового середовища проводилася за методологією, яка зазвичай застосовується, з визначенням специфічної хвильової потужності за залежністю (1):

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{64\pi}; \quad (1)$$

що дозволяє встановити кількісну оцінку доступної енергії при різних комбінаціях висоти та періоду хвилі [11; 12].

Він показує характерне квадратичне зростання потужності та дозволяє визначити діапазон максимальної вихідної потужності, досягнутої хвильовою електростанцією. Результат показано графічно на рисунку 1, щоб проілюструвати залежність потужності від висоти хвилі.

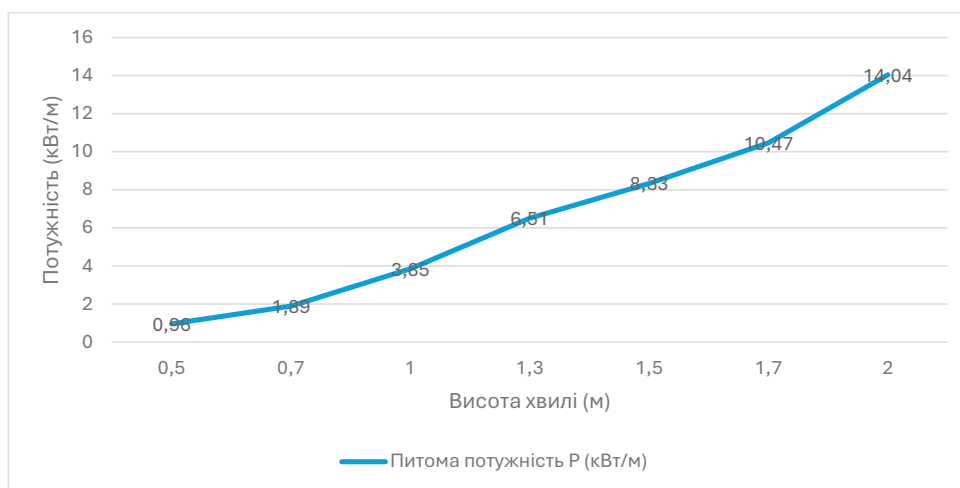


Рис. 1. Залежність питомої потужності хвилі від висоти хвилі при сталому періоді $T = 6$ с

Природа кривої є квадратичною, і тому вона тісно відповідає класичним моделям прогнозування енергії хвиль. При великій висоті хвилі генерована потужність зростає значно швидше, і при $H=2$ м значення перевищує 14 кВт/м, що відповідає типовим показникам для прибережних районів внутрішніх морів. Графік можна використовувати для визначення максимальних параметрів хвиль, при яких автономна хвильова електростанція може забезпечити найвищий рівень енергії. Щодо визначених результатів хвильового потоку, зміщення буя було змодельовано як лінійну коливальну систему, яка має природну частоту, що відповідає середній частоті хвиль цього прибережного регіону. Для цього використовувалася амплітудно-частотна характеристика (2).

$$A(f) = \frac{A_0}{\sqrt{(1 - (f/f_0)^2)^2 + (2\zeta f/f_0)^2}} \quad (2)$$

дозволяючи оцінити резонанс перетворювача з хвильовим фронтом [12; 13]. Графік отриманих даних ілюструється на рис. 2, і різке збільшення, що спостерігається поблизу резонансної частоти, підтверджує, що вибір геометричного параметра та масово-інерційних параметрів буйка був обґрунтованим.

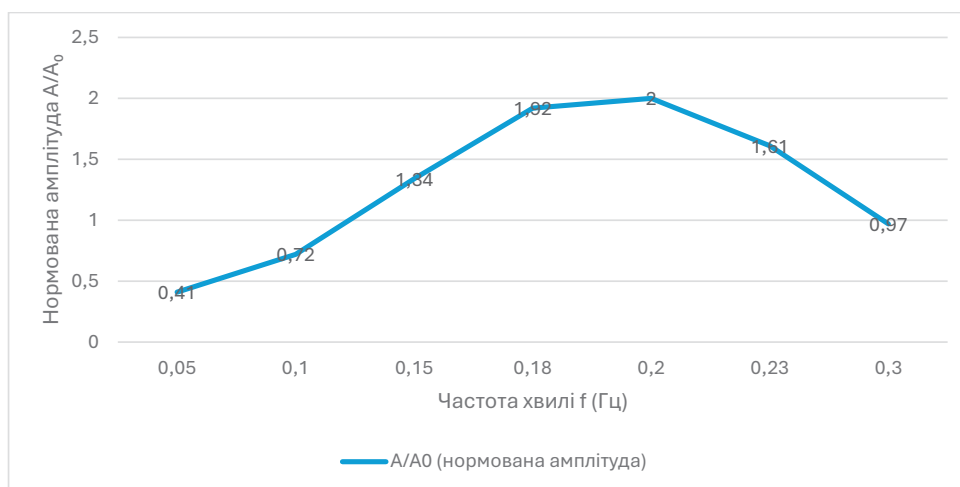


Рис. 2. Амплітудно-частотна характеристика коливань буя хвильового перетворювача

Модель (2) показує, що коливання буя залежать від частотних збурень хвиль. Резонансний пік спостерігається в області близько 0,20 Гц, що відображає типові хвильові режими для прибережних районів внутрішніх морів. Зростання амплітуди між 0,15 Гц і 0,20 Гц підтверджує, що масово-інерційні параметри буя тісно імітують особливості хвильового середовища. Після проходження через резонанс амплітуда поступово зменшується, що підтверджує вплив демпфування та правильність вибору параметра ζ для системи приводу РТО. Графік яскраво відображає діапазон робочих частот, в якому хвильова електростанція забезпечує максимальну потужність для поглинання енергії. Після налаштування цих параметрів ми розраховуємо механічну потужність, яку система може передати на привід РТО. Перехід до електричної енергії залежав від типу перетворювача, коефіцієнтів втрат і умов роботи генератора. Таблиця 1 зображує узагальнені технічні показники, що дозволяє оцінити зв'язок між хвильовим режимом, рухом буя та генерацією електроенергії.

Таблиця 1

Узагальнені технічні параметри автономної хвильової електростанції

Параметр	Значення
Тип перетворювача (WEC)	Point Absorber
Робоча висота хвилі, Н	0.7–1.5 м
Період хвилі, Т	5–6 с
Питома потужність хвилі	2.5–8.3 кВт/м
Номинальна потужність генератора	5 кВт
ККД РТО	28–41 %
Добова генерація	80–92 кВт·год
Глибина встановлення	12–18 м

Таблиця 1 показує, що розроблена автономна хвильова електростанція добре функціонує в умовах хвильового середовища з нормальними налаштуваннями для внутрішніх морів на узбережжі, які покладаються на перетворювач типу поглинач. Висота хвиль від 0,7 до 1,5 м і інтервали між 5–6 секундами визначають хвильовий клімат, завдяки якому система здатна працювати на резонансній частоті. Це максимізує амплітуду вертикальних коливань буйка і допомагає системі РТО ефективніше витягувати енергію. Розрахована специфічна хвильова потужність – яка становить близько 2,5–8,3 кВт/м – відповідає діапазону, визнаному прийнятним для автономних систем малої потужності у світі [14; 15]. Це вказує на те, що енергетичний ресурс на узбережжі не лише достатній для обслуговування роботи однієї установки, але й для генерації невеликого резерву потужності, який може накопичуватися і подаватися під час пікового споживання. Особливо важливим є показник ефективності системи РТО (28–41%). Для хвильових установок малого класу ці значення є нормальними і відповідають даним ЕМЕС [3]. Нижня межа відповідає роботі при низькій хвильовій потужності, а верхня межа досягається з частковим підвищенням резонансу. Це разом з номінальною потужністю генератора 5 кВт призводить до щоденної генерації від 80 до 92 кВт·год, що є достатнім для роботи навігаційних буйків, станцій телеметричного спостереження, прибережних постів, малих економічних об'єктів або віддалених дослідницьких пунктів. Глибина установки 12–18 м вказує на напрямок системи до водних зон, де хвильовий процес достатньо сформований, але має менший вплив дна. Також це забезпечує стабільність параметрів хвильового фронту, спрощуючи установку та обслуговування. Цей діапазон глибин має бути доступним у більшості прибережних районів України. Важливою частиною дослідження було моделювання щоденної генерації автономної хвильової електростанції під впливом природних хвильових коливань. Для цього була розроблена тимчасова модель, висота і період хвиль змінювалися зі стохастичним компонентом на висоті і період часу моделювалися, що відповідає реалістичним умовам. Відповідна крива щоденного виробництва (Рисунок 3) зображує профіль вихідної потужності для кожного дня в годинах і може визначити, чи може генераційна потужність такої системи забезпечити надійне виробництво вихідної потужності на цьому етапі за різних умов і, отже, аналіз здатності станції забезпечити стабільну потужність, коли існує накопичений буфер.

Рис. 3 показує змодельоване зображення добового профілю генерації електроенергії від автономної хвильової електростанції з природною варіабельністю у хвильовому середовищі. Ця крива демонструє регулярні коливання вихідної потужності через зміни висоти хвиль і періоду протягом добового циклу. У середині дня (12:00–15:00) стають видимими пікові значення генерації, коли фронт хвилі стає більш енергійним; вночі та вранці потужність зменшується. Такий розподіл відповідає типовому хвильовому режиму прибережних зон внутрішніх морів: добова нерівномірність хвильової активності формується синоптичними факторами. Підсумовуючи результати моделювання та аналізу, очевидно, що автономна хвильова електростанція типу поглинач демонструє узгодженість між усіма ключовими підсистемами – від збудження хвиль до генерації електроенергії. Поєднання розрахунків хвильового потенціалу, частотної характеристики буя та характеристик системи РТО дозволило систематично зрозуміти режими роботи станції, а також визначити умови, за яких досягається максимальна кількість енергії. Подальше моделювання добової генерації підтвердило, що така станція може надійно працювати в умовах

природної стохастичності хвильового середовища з буфером збору. Отримані результати демонструють потенціал такого ретельно підготовленого підходу для сфери автономних прибережних енергетичних систем, а також закладають основу для подальшої оптимізації дизайну моделі, підвищення ефективності РТО та дослідження роботи станції за різних хвильових умов.

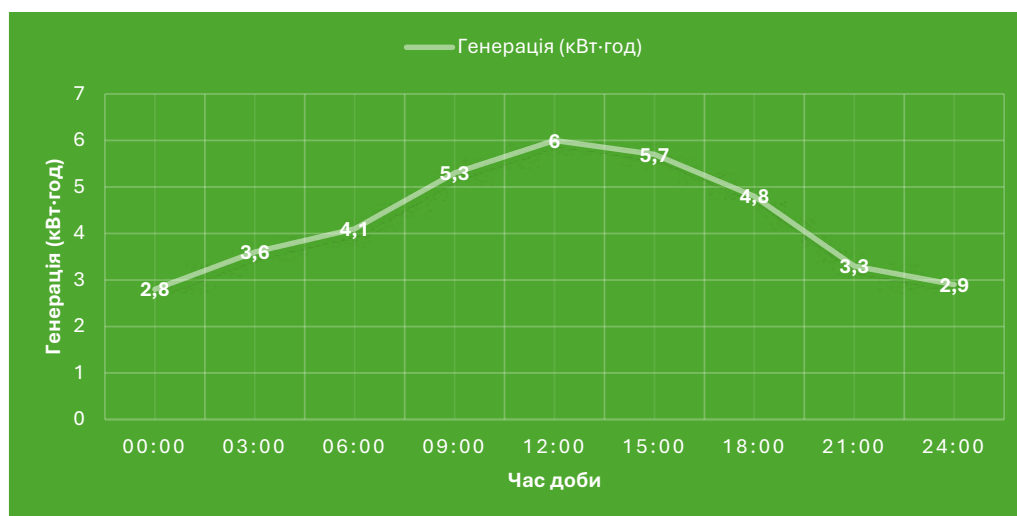


Рис. 3. Добовий профіль генерації хвильової електростанції

Висновки

Результати цього дослідження дозволили повністю охарактеризувати автономну хвильову електростанцію типу точкового абсорбера, що працює в типових прибережних умовах внутрішніх морів. Згідно з розрахунками хвильового потенціалу, було встановлено, що при висоті хвилі 0,7–1,5 м і періоді 5–6 секунд, питома потужність хвильового потоку становить 2,5–8,3 кВт/м, що є адекватним ресурсом для ефективної роботи низькопотужних перетворювачів. Побудований графік залежності питомої потужності від висоти хвилі показав квадратичне зростання енергетичного потенціалу і дозволив реалізувати робочий діапазон, в якому станція генеруватиме максимальну потужність. Амплітудно-частотна характеристика коливальної системи буя та частотна характеристика резонансів показали виражений резонансний максимум біля 0,20 Гц, що є приблизною частотою, з якою хвиля поводить себе в прибережних зонах. Це підтверджує правильність вибору геометричних та масо-інерційних параметрів коливального буя і підтверджує, що перетворювач добре працює в розширеному режимі поглинання енергії. Повільне зменшення амплітуди поза резонансною областю покаже, що демпфуючі характеристики системи РТО є критичним елементом для стабільності електричного виходу. Ефективність РТО у 28–41% відповідає міжнародним експериментальним даним, забезпечуючи генерацію 80–92 кВт·год для номінальної потужності генератора 5 кВт на добу. Такі показники підтверджують доцільність системи для автономного енергопостачання малих об'єктів – навігаційних буїв, сенсорних станцій, прибережних постів або окремих економічних структур. Щоденне моделювання виробництва показало, що протягом 24 годин варіації хвильового потенціалу є по суті стохастичними і призводять до нерівномірної генерації. Але при нижчих нічних значеннях станція все ще підтримує стабільну роботу з буфером накопичення для згладжування пікових варіацій і енергопостачання. Досягнуті результати підтвердили можливість використання автономних хвильових електростанцій типу точкового абсорбера для електропостачання прибережних районів з помірним хвильовим потенціалом. Дослідження підтримує концепцію подальшої оптимізації конструкції технології буя, вдосконалення системи вилучення енергії РТО та розширених моделей генерації, пристосованих до сезонних змін хвильового клімату. Інші можливості включають інтеграцію таких установок з адаптивним управлінням навантаження в межах локальних мікромереж.

Список використаної літератури

1. International Electrotechnical Commission. IEC 62600-101: Marine Energy – Wave, Tidal and Other Water Current Converters – Part 101: Wave Energy Resource Assessment and Characterisation. Geneva: IEC, 2015. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/22293>
2. International Electrotechnical Commission. IEC TS 62600-2: Marine Energy – Wave, Tidal and Other Water Current Converters – Part 2: Design Requirements for Marine Energy Systems. Geneva: IEC, 2016. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/24764>

3. European Marine Energy Centre. EMEC Wave Energy Converter Performance Database and Guidelines. Orkney: EMEC, 2020. URL: <https://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>
4. Капітанчук К., Андрійшин М. Характеристики потужності хвильової електростанції з гнучкою енергопоглинальною поверхнею в умовах внутрішнього моря. *Наукоємні технології*. № 61(1). Київ, 2024. С. 94–101. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.61.18517>
5. Kapitanchuk K., Andriyishyn M. Determination of Parameters of a Small Power Plant on a River with an Energy-Absorbing Surface in the Form of a Sinusoidal Helicoid. *Science-Based Technologies*. № 65(1). Kyiv, 2025. P. 141–146. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.65.19935>
6. Prasad K. A., Chand A. A., Kumar N. M., Narayan S., Mamun K. A. A critical review of power take-off wave energy technology leading to the conceptual design of a novel wave-plus-photon energy harvester for island/coastal communities' energy needs. *Sustainability*. № 14(4). Basel, 2022. Article 2354. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/4/2354>
7. Bonamano S., Peviani M. A., Agate G., Burgio C. G., Fersini G., Marcelli M. The evaluation of WaveSAX power generation to support port energy self-sufficiency. *Journal of Marine Science and Engineering*. № 11(11). Basel, 2023. Article 2097. <https://doi.org/10.3390/jmse11112097>
8. Cascajo R., Molina R., Pérez-Rojas L. Sectoral Analysis of the Fundamental Criteria for the Evaluation of the Viability of Wave Energy Generation Facilities in Ports – Application of the Delphi Methodology. *Energies*. № 15(7). Basel, 2022. Article 2667. <https://doi.org/10.3390/en15072667>
9. Nazare T., Nardo L., Arias-García J., Nepomuceno E. Ensuring resilience in ocean energy power plants: a survey of cybersecurity measures. *Proceedings of the European Wave and Tidal Energy Conference*. Vol. 15. Paris, 2023. <https://doi.org/10.36688/ewtec-2023-452>
10. Clemente D., Teixeira-Duarte F., Rosa-Santos P., Taveira-Pinto F. Advancements on optimization algorithms applied to wave energy assessment: an overview on wave climate and energy resource. *Energies*. № 16(12). Basel, 2023. Article 4660. <https://doi.org/10.3390/en16124660>
11. Mi J., Wu X., Capper J., Li X., Shalaby A., Wang R., Zuo L. Experimental investigation of a reverse osmosis desalination system directly powered by wave energy. *Applied Energy*. № 343. Amsterdam, 2023. Article 121194. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121194>
12. Alshmeel G. H. A., Al-Doori A. S. B., Ahmed S. R., Abraham Z. A., Ghaffoori A. J., Hussain A. S. T. Self-sustaining buoy system: harnessing water wave energy for smart, wireless sensing and data transmission. *Proceedings of the Cognitive Models and Artificial Intelligence Conference*. Lisbon, 2024. P. 349–356. <https://doi.org/10.1145/3660853.3660940>
13. De Oliveira L., Dos Santos I. F. S., Schmidt N. L., Tiago Filho G. L., Camacho R. G. R., Barros R. M. Economic feasibility study of ocean wave electricity generation in Brazil. *Renewable Energy*. № 178. Amsterdam, 2021. P. 1279–1290. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.009>
14. Li H., Wu X., Zhang Z., Tan X., Pan Y., Dai C., Xu Y. An extended-range wave-powered autonomous underwater vehicle applied to underwater wireless sensor networks. *iScience*. № 25(8). Cambridge, 2022. Article 104596. URL: [https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042\(22\)01010-0](https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042(22)01010-0)
15. Garcia D. A., Dionysis G., Raskovic P., Duić N. Advanced technological options for sustainable development of energy, water and environment systems upgrade towards climate neutrality. *Energy Conversion and Management: X*. № 22. Amsterdam, 2024. Article 100528. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100528>

References

1. International Electrotechnical Commission. (2015). IEC 62600-101: Marine energy – Wave, tidal and other water current converters – Part 101: Wave energy resource assessment and characterisation. IEC. <https://webstore.iec.ch/publication/22293>
2. International Electrotechnical Commission. (2016). IEC TS 62600-2: Marine energy – Wave, tidal and other water current converters – Part 2: Design requirements for marine energy systems. IEC. <https://webstore.iec.ch/publication/24764>
3. European Marine Energy Centre. (2020). *EMEC Wave Energy Converter performance database and guidelines*. EMEC. <https://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>
4. Kapitanchuk, K., & Andriyishyn, M. (2024). Kharakterystyky potuzhnosti khvylovoi elektrostantsii z hnutkoiu enerhopohlynalnoiu poverkhnei v umovakh vnutrishnoho morya [Power characteristics of a wave power plant with a flexible energy-absorbing surface in inland sea conditions]. *Naukoiemni tekhnolohii*, 61(1), 94–101. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.61.18517> [in Ukrainian].
5. Kapitanchuk, K., & Andriyishyn M. (2025). Determination of Parameters of a Small Power Plant on a River with an Energy-Absorbing Surface in the Form of a Sinusoidal Helicoid. *Science-Based Technologies*, 65(1), 141–146. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.65.19935>
6. Prasad, K. A., Chand, A. A., Kumar, N. M., Narayan, S., & Mamun, K. A. (2022). A critical review of power take-off wave energy technology leading to the conceptual design of a novel wave-plus-photon energy harvester for island/coastal communities' energy needs. *Sustainability*, 14(4), 2354. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/4/2354>

7. Bonamano, S., Peviani, M. A., Agate, G., Burgio, C. G., Fersini, G., & Marcelli, M. (2023). The evaluation of WaveSAX power generation to support port energy self-sufficiency. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(11), 2097. <https://doi.org/10.3390/jmse11112097>
8. Cascajo, R., Molina, R., & Pérez-Rojas, L. (2022). Sectoral Analysis of the Fundamental Criteria for the Evaluation of the Viability of Wave Energy Generation Facilities in Ports—Application of the Delphi Methodology. *Energies*, 15(7), 2667. <https://doi.org/10.3390/en15072667>
9. Nazare, T., Nardo, L., Arias-Garcia, J., & Nepomuceno, E. (2023, September). Ensuring resilience in ocean energy power plants: a survey of cybersecurity measures. *Proceedings of the European wave and tidal energy conference*, 15. <https://doi.org/10.36688/ewtec-2023-452>
10. Clemente, D., Teixeira-Duarte, F., Rosa-Santos, P., & Taveira-Pinto, F. (2023). Advancements on optimization algorithms applied to wave energy assessment: an overview on wave climate and energy resource. *Energies*, 16(12), 4660. <https://doi.org/10.3390/en16124660>
11. Mi, J., Wu, X., Capper, J., Li, X., Shalaby, A., Wang, R., ... & Zuo, L. (2023). Experimental investigation of a reverse osmosis desalination system directly powered by wave energy. *Applied Energy*, 343, 121194. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121194>
12. Alshmeel, G. H. A., Al-Doori, A. S. B., Ahmed, S. R., Abraham, Z. A., Ghaffoori, A. J., & Hussain, A. S. T. (2024, May). Self-sustaining buoy system: harnessing water wave energy for smart, wireless sensing and data transmission. In *Proceedings of the Cognitive Models and Artificial Intelligence Conference*, 349–356. <https://doi.org/10.1145/3660853.3660940>
13. de Oliveira, L., dos Santos, I. F. S., Schmidt, N. L., Tiago Filho, G. L., Camacho, R. G. R., & Barros, R. M. (2021). Economic feasibility study of ocean wave electricity generation in Brazil. *Renewable Energy*, 178, 1279–1290. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.009>
14. Li, H., Wu, X., Zhang, Z., Tan, X., Pan, Y., Dai, C., ... & Xu, Y. (2022). An extended-range wave-powered autonomous underwater vehicle applied to underwater wireless sensor networks. *Iscience*, 25(8). [https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042\(22\)01010-0](https://www.cell.com/iscience/fulltext/S2589-0042(22)01010-0)
15. Garcia, D. A., Dionysis, G., Raskovic, P., & Duić, N. (2024). Advanced technological options for sustainable development of energy, water and environment systems upgrade towards climate neutrality. *Energy Conversion and Management: X*, 22, 100528. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100528>

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

О. М. БЛИЗНЮК

доктор технічних наук, професор,
завідувачка кафедри біотехнології, біофізики та аналітичної хімії
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
ORCID: 0000-0002-2595-8421

А. А. ВОРОНКІН

доктор філософії,
асистент кафедри технології пластичних мас і біологічно активних полімерів
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
ORCID: 0000-0002-8893-4400

В. В. ВОЛОЩУК

доктор філософії,
молодший науковий співробітник кафедри технології кераміки,
вогнетривів, скла та емалей
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
ORCID: 0000-0003-2120-3088

М. Д. МІРОШНИЧЕНКО

інженер кафедри технології пластичних мас і біологічно активних полімерів
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
ORCID: 0009-0004-9505-5174

В. В. ЛЕБЕДЄВ

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри технології пластичних мас і біологічно активних полімерів
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
ORCID: 0000-0001-6934-2349

ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-БІОПРИНТИНГУ З ВИКОРИСТАННЯМ БІОЛОГІЧНО-АКТИВНИХ ГІДРОГЕЛІВ

Стаття присвячена аналізу сучасних тенденцій розвитку технологій 3D-біопринтингу з використанням біологічно-активних гідрогелів, які є ключовими матеріалами для створення тканинних конструкцій у регенеративній медицині. Розглянуто властивості гідрогелів, їх класифікацію за типом стимулів (термо-, pH-, фото-, електро- та магніточутливі), а також переваги «розумних» полімерних систем, здатних реагувати на зміни зовнішнього середовища. Окрему увагу приділено біочорнилам на основі природних (алгінат, колаген, желатин) та синтетичних (PEG, Pluronic F127, ПВА) гідрогелів, а також гібридним системам, що поєднують біосумісність і механічну стабільність. Описано методи отримання біочорнил (фізичне змішування, хімічне зшивання, фотополімеризація, коаксіальне друкування) та вимоги до їх реологічних і механічних характеристик. Наведено порівняльний аналіз основних типів біопринтерів (екструзійних, струменевих, лазерних, гібридних) за точністю, швидкістю та сумісністю з матеріалами. Показано, що сучасні біопринтери оснащуються багатоканальними системами подачі, автоматизованим контролем температури та стерильності, а також інтеграцією алгоритмів штучного інтелекту для оптимізації процесу друку. Визначено перспективи розвитку технології, які полягають у вдосконаленні біочорнил, стандартизації процесів та впровадженні інтелектуальних систем управління для створення персоналізованих тканинних конструкцій та органів. Отримані результати демонструють значний потенціал 3D-біопринтингу для вирішення проблем трансплантації, тестування лікарських засобів та розвитку регенеративної медицини.

Ключові слова: 3D-біопринтинг, біочорнила, біологічно-активні гідрогелі, желатин, альгінат, властивості, застосування, «розумні» полімери, термо- та магніточутливі, регенеративна медицина.

O. M. BLIZNYUK

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Biotechnology, Biophysics and Analytical Chemistry
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-2595-8421

A. A. VORONKIN

Doctor of Philosophy,
Assistant at the Department of Technology of Plastics
and Biologically Active Polymers
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-8893-4400

V. V. VOLOSHCHUK

Doctor of Philosophy,
Junior Researcher at the Department of Technology of Ceramics,
Refractories, Glass and Enamels
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0003-2120-3088

M. D. MIROSHNYCHENKO

Engineer at the Department of Technology of Plastics
and Biologically Active Polymers
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0009-0004-9505-5174

V. V. LEBEDEV

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Technology of Plastics
and Biologically Active Polymers
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0001-6934-2349

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF 3D BIOPRINTING TECHNOLOGIES USING BIOLOGICALLY ACTIVE HYDROGELS

The article is devoted to the analysis of current trends in the development of 3D bioprinting technologies using biologically active hydrogels, which are key materials for creating tissue constructs in regenerative medicine. The properties of hydrogels, their classification by type of stimuli (thermal, pH, photo, electro and magnetic sensitive), as well as the advantages of "smart" polymer systems capable of responding to changes in the external environment are considered. Special attention is paid to bioinks based on natural (alginate, collagen, gelatin) and synthetic (PEG, Pluronic F127, PVA) hydrogels, as well as hybrid systems that combine biocompatibility and mechanical stability. Methods for obtaining bioinks (physical mixing, chemical crosslinking, photopolymerization, coaxial printing) and requirements for their rheological and mechanical characteristics are described. A comparative analysis of the main types of bioprinters (extrusion, inkjet, laser, hybrid) in terms of accuracy, speed and compatibility with materials is presented. It is shown that modern bioprinters are equipped with multi-channel feed systems, automated temperature and sterility control, as well as the integration of artificial intelligence algorithms to optimize the printing process. The prospects for the development of the technology are determined, which consist in improving bioinks, standardizing processes and implementing intelligent control systems for creating personalized tissue structures and organs. The results obtained demonstrate the significant potential of 3D bioprinting for solving the problems of transplantation, testing drugs and developing regenerative medicine.

Key words: 3D bioprinting, bioink, biologically active hydrogels, gelatin, alginate, properties, applications, "smart" polymers, thermosensitive, regenerative medicine.

Постановка проблеми

За останнє десятиліття досить швидко почали розвиватись технології 3D-біопрінтингу, які є перспективним напрямом в сфері отримання штучних біологічних органів, регенеративної та відновлювальної медицині [1]. 3D-біопрінтинг може вирішити багато серйозних проблем трансплантації та порівняно із традиційними медичними технологіями дає можливість виготовляти індивідуальні, персоналізовані тканинні конструкти та штучні суглоби, хрящі та органи. Ураження суглобів та хрящів при травмах та хворобах мають обмежений потенціал само-відновлення через аваскулярність та низьку клітинність тканини, що зумовлює хронічний біль і функціональні

порушення та мотивує пошук інженерних рішень для регенерації хряща. 3D біопринтинг дає змогу ієрархічно відтворювати геометрію, зонову організацію та мікрооточення хряща завдяки контрольованому осадженню «біо-чорнила» – сумішей біологічно-активних гідрогелів, клітин і біоактивних факторів [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Технологія 3D-біодруку є однією з найперспективніших галузей сучасної біоінженерії [1-3]. Вона дозволяє створювати тканини, органи та біологічні структури шляхом пошарового нанесення біоматеріалів [4,5]. Сучасні конструкції біопринтерів відрізняються за принципом роботи, точністю та можливістю використання різних типів біочорнил на основі біологічно-активних гідрогелів.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження статті є аналіз основних технологій 3D-біопринтерів з використанням біологічно-активних гідрогелів та тенденцій їх розвитку.

Викладення основного матеріалу дослідження

Біологічно-активні гідрогелі – це макромолекули, які підрозділяються на природні (біополімери) та штучні [6]. Біологічно-активні гідрогелі – це двофазний матеріал, суміш пористих і проникних твердих речовин і щонайменше 10% води або іншої рідини. Тверда фаза – це нерозчинна у воді тривимірною мережа полімерів, яка поглинула велику кількість води або біологічних рідин [7]. Багато біологічно-активних гідрогелів є синтетичними, але деякі отримують із природних матеріалів. Біологічно-активні гідрогелі широко використовуються для різного промислового, харчового, косметологічного та біомедичного та іншого застосування – загусники, креми, гелі, речовини тканинної інженерії та молекулярного імпринтингу, сфера імуноізоляції та стоволової терапії, перев'язувальні матеріали, основа для доставки ліків та тощо [8].

Біологічно-активні гідрогелі являють собою зшиті гідрофільні полімери, здатні набухати у воді та формувати нерозчинну тривимірну просторову сітку. Сітчаста структура гідрогелів зазвичай побудована зшитими полімерними ланцюгами. Вони можуть бути гнучкими і м'якими, що є результатом їх водопоглинаючої здатності. Через високий вміст води, м'яку структуру та пористість, вони нагадують шкіру живого організму. Внаслідок здатності поглинати та утримувати значні обсяги рідини, гідрогелі стали предметом ретельного вивчення не тільки з позицій виявлення фундаментальних закономірностей поведінки набряклих полімерних систем, а й з позицій практичного застосування у цілій низці галузей. Оскільки гідрогелі біологічно розкладаються, біосумісні та нетоксичні, вони викликають великий інтерес у фармацевтичній та біомедичній галузях [9].

Сучасні досягнення у області створення полімерів дозволили розробити так звані «розумні» біологічно-активні гідрогелі [10,11]. Їх особливість полягає в тому, що вони, за аналогією з живою матерією, здатні сприймати інформацію з навколишнього середовища та змінюватись відповідно до цієї інформації. Серед водорозчинних полімерів і гідрогелів «розумними» можуть бути названі системи, які оборотно реагують на зміни властивостей середовища (рН, температура, присутність певних речовин, освітленість, електричне поле). Полімерні гідрогелі на основі «розумних» полімерів – це пористі, добре набухаючі, але нерозчинні у воді матеріали, які при зміні зовнішніх умов, наприклад, температури, кислотності або хімічного складу середовища здатні змінювати ступінь набухання у воді або навіть переходити у розчинний стан. Набухання є характерною властивістю гідрогелів, яка залежить від різних умов навколишнього середовища, таких як рН і температура.

Гідрогелі можна класифікувати за різними критеріями.

– гідрогелі, що реагують на один стимул:

1. Термочутливі гідрогелі. Термогелі – це тип полімерів, які утворюють гелі шляхом набухання у воді. У багатьох термочутливих полімерів спостерігається зменшення або збільшення розчинності при зміні температури. Термогелі складаються з амфіфільних полімерів, що містять як гідрофільні, так і гідрофобні ділянки, що дозволяє їм здійснювати золь-гель фазовий перехід у відповідь на зміни температури. Це відбувається без потреби в зовнішніх тригерах, наприклад, таких як ферменти, що робить процес екологічно безпечним. Відсутність токсичних зшиваючих агентів підвищує біосумісність термогелів. Застосування термогелів поширюється на різні галузі, включаючи доставку ліків, де вони використовуються для створення систем контрольованого та пролонгованого вивільнення завдяки їхній здатності проходити золь-гель перехід у відповідь на зміни температури. У 3D-культури клітин термогелі забезпечують опорний каркас, який імітує позаклітинний матрикс, сприяючи росту клітин та формуванню тканин. Крім того, в тканинній інженерії ці гідрогелі відіграють вирішальну роль, забезпечуючи біосумісне та ін'єкційне середовище, яке підтримує проліферацію клітин та регенерацію тканин, що робить їх дуже придатними для відновлення та регенерації тканин *in situ*.

2. Гідрогелі, що реагують на рН. рН-чутливі гідрогелі інтенсивно розробляються, причому на їхню поведінку при набуханні та розбуханні впливає кілька факторів. Ці фактори включають іонний заряд, ступінь іонізації, рН навколишнього середовища, тип мономеру, концентрацію полімеру та гідрофільність сіток. Найважливіші екологічні застосування рН-чутливих гідрогелів включають очищення води, контрольоване вивільнення агрохімікатів, екологічне зондування та відновлення ґрунту. Найважливіші біомедичні застосування рН-чутливих гідрогелів

включають системи доставки ліків та терапію раку, тканинну інженерію, загоєння ран, біосенсоріку та контрольоване вивільнення терапевтичних агентів.

3. Фоточутливі гідрогелі. Фоточутливі гідрогелі інтегровані з фотореактивним компонентом. Світловий сигнал стимулює хімічну реакцію. Цей сигнал передається функціональному компоненту гідрогелю, регулюючи його властивості. Фоточутливі гідрогелі використовуються для створення динамічних клітинних мікросередовищ, що забезпечують контрольоване вивільнення ліків, проектування адаптивних поверхонь, розробки м'яких актуаторів та виробництва загоєваних м'яких матеріалів.

4. Електрочутливі гідрогелі. Електрочутливі, або електроактивні, гідрогелі та наногідрогелі – це особливий клас матеріалів, здатних зазнавати точних просторових змін – розширення або стискання – у відповідь на зовнішнє електричне поле. Ці гідрогелі застосовуються для створення біоміметичних штучних м'язів. Їх швидка та відтворювана активація робить їх безцінними для доставки ліків та біомедичної інженерії.

5. Магніточутливі гідрогелі. Магніточутливі гідрогелі – це матеріали з вбудованими магнітними наночастинками, такими як оксид заліза або інші феромагнітні матеріали. Ці наночастинки рівномірно розподіляються в матриці гідрогелю. Під впливом магнітного поля змінюються механічні, структурні або функціональні властивості гідрогелю. Магніточутливі гідрогелі мають широкий спектр застосування в різних галузях, часто для цілеспрямованої доставки ліків. Вони також відіграють певну роль у тканинній інженерії як каркаси з регульованими механічними властивостями, що сприяють росту та диференціації клітин. Крім того, ці гідрогелі використовуються при лікуванні раку. У галузі м'якої робототехніки та актуаторів магніточутливі гідрогелі ідеально підходять для створення пристроїв, які можуть зазнавати оборотних змін форми під дією магнітних подразників, що дозволяє розробляти м'які роботизовані системи, актуатори та штучні м'язи.

6. Гідрогелі, що реагують на різні стимули: гідрогелі, що реагують на різні подразники, мають кілька переваг порівняно з гідрогелями, що реагують на один подразник. Ці гідрогелі також є більш стабільними та чутливими, зберігаючи функціональність у ширшому діапазоні умов. Вони мають ширшу сферу застосування, включаючи біомедичне використання (наприклад, цільова доставка ліків та тканинна інженерія), м'яку робототехніку, відновлення навколишнього середовища та багатофункціональні сенсори.

Властивості конкретного гідрогелю відіграють вирішальну роль у визначенні його придатності для певного застосування. Однак на ці властивості значною мірою впливають умови навколишнього середовища. У деяких випадках випробування гідрогелю в точних умовах його передбачуваного застосування неможливе. У таких випадках особливо важливо використовувати теоретичні моделі для детального вивчення його властивостей на різних умовах.

3D-біопринтинг є інноваційною технологією, що дозволяє створювати складні біологічні структури шляхом пошарового нанесення біочорнил на основі біологічно-активних гідрогелів, які містять живі клітини та біоактивні компоненти. Для 3D-біопринтингу використовуються біочорнила – матеріали, наповнені біологічними компонентами. Біочорнила можуть містити живі клітини (наприклад, стовбурові або отримані від пацієнта) і біосумісні основи, такі як колаген, желатин чи альгінат. Ці матеріали створюють середовище, яке підтримує ріст і функціонування клітин, що є критично важливим для створення біологічно активних структур.

Основою для таких біочорнил часто виступають саме біологічно-активні гідрогелі – полімерні матеріали з високим вмістом води, які імітують позаклітинне середовище. Вибір та модифікація біологічно-активних гідрогелів є критично важливими для забезпечення біосумісності, механічної стабільності та функціональності надрукованих конструкцій.

Біочорнила для технології 3D-біопринтингу класифікуються за типом біологічно-активних гідрогелів:

- природні гідрогелі: алгінат, агароза, желатин, колаген, декліаризована матриця (dECM);
- синтетичні гідрогелі: поліетиленгліколь (PEG), Pluronic F127, полівініловий спирт (ПВА);
- гібридні системи: комбінації природних і синтетичних полімерів для оптимізації властивостей.

Природні гідрогелі мають високу біосумісність, але часто недостатню механічну міцність. Синтетичні – навпаки, забезпечують стабільність, але потребують додаткової функціоналізації для біоактивності.

Процеси отримання біочорнил на основі біологічно-активних гідрогелів включають [10]:

- фізичне змішування гідрогелю з клітинами та біоактивними молекулами;
- хімічне зшивання (наприклад, за допомогою ензимів або світла);
- фотополімеризація – використання світлочутливих компонентів для формування стабільної структури;
- коаксіальне друкування – створення багатошарових структур з різними функціональними зонами.

Для ефективного клінічного застосування біочорнила для технології 3D-біопринтингу повинні відповідати вимогам [11]:

- біосумісність та стерильність;
- відтворюваність процесу друку;
- регуляторне схвалення (FDA, EMA).

Також біочорнила для технології 3D-біопринтингу на основі біологічно-активних гідрогелів мають задовольняти рівнем реологічних та механічних властивостей [12]:

- в'язкість – впливає на здатність до екструзії;
- гелеутворення – стабільність структури після друку;
- еластичність – відповідність механічним властивостям тканин.

Досить важливим напрямом в отриманні ефективних біочорнил для технології 3D-біопринтингу на основі біологічно-активних гідрогелів є їх функціоналізація. Функціоналізація біочорнил передбачає [13]:

- вбудовування факторів росту (VEGF, BMP-2);
- використання декліаризованої матриці для імітації природного мікрооточення;
- генетична модифікація клітин для підвищення їх життєздатності та функціональності.

Таким чином, отримання біочорнил на основі біологічно-активних гідрогелів є багатокомпонентним процесом, що включає вибір матеріалу, його модифікацію, функціоналізацію та тестування [14]. Сучасні дослідження демонструють значний прогрес у створенні біочорнил, здатних підтримувати життєздатність клітин, імітувати природне мікрооточення та забезпечувати точність друку. Подальші дослідження мають бути спрямовані на стандартизацію процесів та інтеграцію біочорнил у клінічну практику.

3D-біодрук на основі біологічно-активних гідрогелів базується на принципі адитивного виробництва, де біоматеріали (гідрогелі, клітинні суспензії) наносяться шарами для формування заданої структури. Ключовими параметрами є точність позиціонування, швидкість друку та сумісність з живими клітинами.

До основних типів та конструкції біопринтерів відносять (табл. 1):

- екструзійні біопринтери: використовують шприцеві системи для видавлювання біочорнил на основі біологічно-активних гідрогелів. Вони підходять для друку великих структур, але мають обмежену точність;
- струменеві біопринтери, які працюють за принципом інжекційного друку біологічно-активних гідрогелів, забезпечуючи високу точність і швидкість, проте обмежені у в'язкості матеріалів;
- лазерні біопринтери на основі біологічно-активних гідрогелів: застосовують лазерне випромінювання для перенесення клітин, що дозволяє досягти високої точності, але потребує складного обладнання;
- гібридні системи на основі біологічно-активних гідрогелів: поєднують кілька технологій для оптимізації процесу друку.

Таблиця 1

Порівняльна таблиця типів 3D-біопринтерів

Тип біопринтера	Точність	Швидкість	Сумісність з матеріалами	Складність конструкції
Екструзійний	Середня	Висока	Висока (гідрогелі різного типу)	Низька
Струменевий	Висока	Висока	Обмежена (низька в'язкість гідрогелів)	Середня
Лазерний	Дуже висока	Середня	Висока (гідрогелі різного типу)	Висока
Гібридний	Висока	Залежить від конфігурації	Висока (гідрогелі різного типу)	Дуже висока

Сучасні біопринтери на основі біологічно-активних гідрогелів оснащуються багатоканальними системами подачі матеріалів, що дозволяє друкувати складні тканинні конструкції. Розробляються моделі з автоматизованим контролем температури та стерильності, а також інтеграцією штучного інтелекту для оптимізації процесу. Прикладом є біопринтери компаній Organovo та CELLINK, які застосовуються для створення тканин для фармакологічних досліджень та регенеративної медицини.

Висновки

Таким чином, Сучасні конструкції 3D-біопринтерів демонструють значний прогрес у точності, функціональності та можливості використання різних біоматеріалів. Вони відкривають перспективи для створення органів на замовлення, тестування лікарських засобів та розвитку персоналізованої медицини. Подальший розвиток технології залежить від удосконалення біочорнил, підвищення швидкості друку та інтеграції інтелектуальних систем управління.

Список використаної літератури

1. Genchi G. G., Sharma J., Kumar R. Najser J., Frantik J., Sunnam N., Sindhu A., Praveenkumar S. Genetic and bioactive functionalization of bioinks for 3D bioprinting.// Bioprocess and Biosystems Engineering. 2025. № 48. P. 1421–1449 DOI:10.1007/s00449-025-03180-y.
2. Ramiah P., du Toit L.C., Choonara Y.E., Kondiah P.P.D., Pillay V. Hydrogel-Based Bioinks for 3D Bioprinting in Tissue Regeneration. Front. Mater. 2020. № 7. P. 76. DOI: 10.3389/fmats.2020.00076.
3. Tarassoli S.P., Jessop Z.M., Jovic T., Hawkins K., Whitaker I.S. Candidate Bioinks for Extrusion 3D Bioprinting—A Systematic Review of the Literature. Front. Bioeng. Biotechnol. 2021. № 9. P. 616753. DOI: 10.3389/fbioe.2021.616753.
4. Mathur V., Agarwal P., Kasturi M., Srinivasan V., Seetharam R.N., Vasanthan K.S. Innovative bioinks for 3D bioprinting: Exploring technological potential and regulatory challenges // J Tissue Eng. 2025. № 20(16). P. 20417314241308022. DOI: 10.1177/20417314241308022.

5. Fatimi A., Okoro O.V., Podstawczyk D., Siminska-Stanny J., Shavandi A. Natural Hydrogel-Based Bio-Inks for 3D Bioprinting in Tissue Engineering: A Review // *Gels*. 2022. № 8. P. 179. DOI:10.3390/gels8030179.
6. Zhang Y., Liu Y., Liu J., Guo P., Heng L. Super water absorbency OMMT/PAA hydrogel materials with excellent mechanical properties // *RSC advances*. 2017. № 7(24). P. 14504-14510. DOI:10.1039/C7RA00372B.
7. Samal S. K., Dash M., Dubruel P., Van Vlierberghe S. Smart polymer hydrogels: properties, synthesis and applications // *Smart polymers and their applications*. 2014. P. 237-270. DOI:10.1533/9780857097026.1.237.
8. Zheng H., Xing L., Cao Y., Che S. Coordination bonding based pH-responsive drug delivery systems // *Coordination Chemistry Reviews*. 2013. № 257(11-12). P. 1933-1944. DOI: 10.1016/j.ccr.2013.03.007.
9. Lee S. C., Kwon I. K., Park K. Hydrogels for delivery of bioactive agents: a historical perspective // *Advanced drug delivery reviews*. 2013. № 65(1). P. 17-20. DOI: 10.1016/j.addr.2012.07.015.
10. Hilmi B., Hamid Z.A.A., Akil H.M., Yahaya B.H. The characteristics of the smart polymer as temperature or pH-responsive hydrogel // *Procedia Chem*. 2016. № 19. P. 406-409. DOI:10.1016/j.proche.2016.03.031.
11. Hoogenboom R. Temperature-responsive polymers: properties, synthesis and applications // *Smart Polym. Their Appl*. 2014. P. 15-44. DOI: 10.1533/9780857097026.1.15.
12. Lima T.d.P.L., Canelas C.A.d.A., Concha V.O.C., Costa F.A.M.d., Passos M.F. 3D Bioprinting Technology and Hydrogels Used in the Process. *J. Funct. Biomater*. 2022. № 13. P. 214. DOI:10.3390/jfb13040214
13. Dell A.C., Wagner G., Own J., Geibel J.P. 3D Bioprinting Using Hydrogels: Cell Inks and Tissue Engineering Applications // *Pharmaceutics*. 2022. № 14. P. 2596. DOI: 10.3390/pharmaceutics14122596.
14. Aftab M., Ikram S., Ullah M., Khan S.U., Wahab A., Naeem M. Advancement of 3D Bioprinting Towards 4D Bioprinting for Sustained Drug Delivery and Tissue Engineering from Biopolymers // *J. Manuf. Mater. Process*. 2025. № 9. P. 285. DOI: 10.3390/jmmp9080285.

References

1. Genchi G. G., Sharma J., Kumar R., Najser J., Frantik J., Sunnam N., Sindhu A., Praveenkumar S. (2025) Genetic and bioactive functionalization of bioinks for 3D bioprinting. // *Bioprocess and Biosystems Engineering*. № 48. P. 1421–1449 DOI:10.1007/s00449-025-03180-y.
2. Ramiah P., du Toit L.C., Choonara Y.E., Kondiah P.P.D., Pillay V. (2020) Hydrogel-Based Bioinks for 3D Bioprinting in Tissue Regeneration. *Front. Mater*. № 7. P. 76. DOI: 10.3389/fmats.2020.00076.
3. Tarassoli S.P., Jessop Z.M., Jovic T., Hawkins K., Whitaker I.S. (2021) Candidate Bioinks for Extrusion 3D Bioprinting—A Systematic Review of the Literature. *Front. Bioeng. Biotechnol*. № 9. P. 616753. DOI: 10.3389/fbioe.2021.616753.
4. Mathur V., Agarwal P., Kasturi M., Srinivasan V., Seetharam R.N., Vasanthan K.S. (2025) Innovative bioinks for 3D bioprinting: Exploring technological potential and regulatory challenges // *J Tissue Eng*. № 20(16). P. 20417314241308022. DOI: 10.1177/20417314241308022.
5. Fatimi A., Okoro O.V., Podstawczyk D., Siminska-Stanny J., Shavandi A. (2022) Natural Hydrogel-Based Bio-Inks for 3D Bioprinting in Tissue Engineering: A Review // *Gels*. № 8. P. 179. DOI:10.3390/gels8030179.
6. Zhang Y., Liu Y., Liu J., Guo P., Heng L. (2017) Super water absorbency OMMT/PAA hydrogel materials with excellent mechanical properties // *RSC advances*. № 7(24). P. 14504-14510. DOI:10.1039/C7RA00372B.
7. Samal S. K., Dash M., Dubruel P., Van Vlierberghe S. (2014) Smart polymer hydrogels: properties, synthesis and applications // *Smart polymers and their applications*. P. 237-270. DOI:10.1533/9780857097026.1.237.
8. Zheng H., Xing L., Cao Y., Che S. (2013) Coordination bonding based pH-responsive drug delivery systems // *Coordination Chemistry Reviews*. № 257(11-12). P. 1933-1944. DOI: 10.1016/j.ccr.2013.03.007.
9. Lee S. C., Kwon I. K., Park K. (2013) Hydrogels for delivery of bioactive agents: a historical perspective // *Advanced drug delivery reviews*. № 65(1). P. 17-20. DOI: 10.1016/j.addr.2012.07.015.
10. Hilmi B., Hamid Z.A.A., Akil H.M., Yahaya B.H. (2016) The characteristics of the smart polymer as temperature or pH-responsive hydrogel // *Procedia Chem*. № 19. P. 406-409. DOI:10.1016/j.proche.2016.03.031.
11. Hoogenboom R. (2014) Temperature-responsive polymers: properties, synthesis and applications // *Smart Polym. Their Appl*. P. 15-44. DOI: 10.1533/9780857097026.1.15.
12. Lima T.d.P.L., Canelas C.A.d.A., Concha V.O.C., Costa F.A.M.d., Passos M.F. (2022) 3D Bioprinting Technology and Hydrogels Used in the Process. *J. Funct. Biomater*. № 13. P. 214. DOI:10.3390/jfb13040214
13. Dell A.C., Wagner G., Own J., Geibel J.P. (2022) 3D Bioprinting Using Hydrogels: Cell Inks and Tissue Engineering Applications // *Pharmaceutics*. № 14. P. 2596. DOI: 10.3390/pharmaceutics14122596.
14. Aftab M., Ikram S., Ullah M., Khan S.U., Wahab A., Naeem M. (2025) Advancement of 3D Bioprinting Towards 4D Bioprinting for Sustained Drug Delivery and Tissue Engineering from Biopolymers // *J. Manuf. Mater. Process*. № 9. P. 285. DOI: 10.3390/jmmp9080285.

Дата першого надходження рукопису до видання: 26.11.2025
 Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 14.12.2025
 Дата публікації: 31.12.2025

Ю. І. БЛЯШИНЕЦЬ

аспірант кафедри лісових машин та автомобільного транспорту
Національний лісотехнічний університет України
ORCID: 0009-0008-4865-7163

ОЦІНЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ЛІСОВОЗНОГО АВТОМОБІЛЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОРТАТИВНОГО ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

Актуальність дослідження зумовлена високим ризиком перекидання лісовозних автомобілів, що експлуатуються в Україні. Цей ризик значно посилюється специфічними факторами: конструктивно високим центром мас, встановленням важкого маніпуляторного обладнання, динамічним характером вантажу (деревина) та експлуатацією на лісових дорогах зі складним рельєфом. Переважна частина автопарку складається із застарілих моделей (наприклад, УРАЛ-4320), не обладнаних сучасними системами контролю стійкості, а їхня модернізація є економічно недоцільною. Проблема полягає у відсутності доступних, портативних дорадчих систем для моніторингу безпеки та збору даних для аналізу ризиків.

Метою дослідження є розробка, прототипування та емпірична валідація портативного, бюджетного пристрою для моніторингу кута поперечного нахилу лісовозного автомобіля в реальному часі з функціями сповіщення водія та геопросторової реєстрації даних.

Методологія дослідження включає проєктування апаратно-програмного комплексу на базі мікроконтролера ESP32, інерціального вимірювального блоку MPU-6050 та GPS-модуля NEO-6M. Проведено польові випробування розробленого пристрою, встановленого на лісовозний автомобіль УРАЛ-4320 з маніпулятором Palfinger PK 15500A.

Виконано порівняльний аналіз двох сценаріїв руху тестовим маршрутом: без навантаження та з повним завантаженням деревиною.

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні та емпіричній перевірці подвійної функціональності портативної системи: 1) як дорадчої системи безпеки для водія; 2) як інструменту збору об'єктивних емпіричних даних (координати, швидкість, кут нахилу) для картографування небезпечних ділянок лісових доріг з метою проактивного управління інфраструктурними ризиками.

Практична цінність роботи полягає у створенні доступного технічного рішення для модернізації застарілого парку лісовозної техніки, що прямо сприяє підвищенню безпеки праці в лісозаготівельній галузі.

Ключові слова: стійкість транспортних засобів, лісовозний автомобіль, портативний моніторинг, безпека лісозаготівель, картографування ризиків.

YU. I. BLIASHYNETS

Postgraduate Student at the Department of Forest Machines
and Automobile Transport
Ukrainian National Forestry University
ORCID: 0009-0008-4865-7163

EVALUATION OF LOGGING TRUCK STABILITY USING A PORTABLE MEASURING DEVICE

The relevance of this research is driven by the high rollover risk associated with logging trucks operated in Ukraine. This risk is significantly amplified by specific factors: a structurally high center of mass, the installation of heavy manipulator equipment (e.g., Palfinger PK 15500A), the dynamic nature of the cargo (timber), and operation on complex-terrain forest roads. The predominant part of the vehicle fleet consists of outdated models (e.g., URAL-4320) that are not equipped with modern Electronic Stability Control (ESC/RSC) systems, and their retrofitting is economically unfeasible. The problem lies in the absence of affordable, portable advisory systems for safety monitoring and data collection for infrastructure risk analysis.

The objective of this work is to design, prototype, and empirically validate a portable, low-cost device for real-time monitoring of a logging truck's lateral tilt angle, featuring driver warning functions and geospatial data logging.

The research methodology includes the design of a hardware-software complex based on an ESP32 microcontroller, an MPU-6050 Inertial Measurement Unit (IMU), and a NEO-6M GPS module. Field tests of the developed device were conducted on a URAL-4320 logging truck equipped with a Palfinger PK 15500A manipulator. A comparative analysis of two scenarios was performed along a test route: driving without a load and with a full timber load.

The scientific novelty lies in the substantiation and empirical verification of the portable system's dual functionality: 1) as an advisory safety system for the driver; 2) as a tool for collecting objective empirical data (coordinates, speed, tilt angle) for mapping hazardous sections of forest roads, enabling proactive infrastructure risk management.

The practical value of the work consists in creating an affordable technical solution for modernizing the outdated fleet of logging vehicles, which directly contributes to improving occupational safety in the logging industry.

Key words: vehicle stability, logging truck, portable monitoring, forestry safety, risk mapping.

Постановка проблеми

Лісотransпортні операції незмінно пов'язані з підвищеним рівнем ризику, де однією з найкритичніших загроз є втрата поперечної стійкості та подальше перекидання лісовозного автомобіля. На відміну від магістральних вантажних перевезень, лісовозний транспорт характеризується унікальною сукупністю факторів, що експоненційно підвищують імовірність аварії.

Однією з ключових причин зниження стійкості лісовозних автомобілів є конструктивно високе розташування центру мас. Важливу роль відіграють і умови експлуатації – здебільшого це неасфальтовані лісові дороги зі складним поздовжнім і поперечним профілем, ухилами, вибоїнами та поворотами з недостатнім або навіть зворотним поперечним нахилом.

Значна частина автопарку, задіяного в лісозаготівлі в Україні, складається з моделей, розроблених десятиліття тому, які конструктивно не оснащені сучасними інтегрованими системами контролю стійкості. Висока вартість та технічна складність інтеграції таких систем у застарілі конструкції робить дооснащення недоцільним.

Як наслідок, утворюється критичний розрив у забезпеченні безпеки: водії найбільш уразливих транспортних засобів залишаються без будь-яких інструментів для об'єктивної оцінки ризику в реальному часі. Таким чином, проблема полягає у відсутності доступного, портативного та ефективного дорадчого пристрою, здатного надавати водієві миттєвий зворотний зв'язок щодо поточної стійкості та одночасно реєструвати геопросторові дані про небезпечні ділянки для подальшого аналізу дорожньої інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні рішення для контролю стійкості важких транспортних засобів можна умовно поділити на дві категорії: активні та пасивні (дорадчі) системи.

Активні системи є стандартом для нових комерційних автомобілів. Вони інтегровані в бортові системи автомобіля і здатні активно втручатися в керування – пригальмовувати окремі колеса або знижувати потужність двигуна для запобігання заносу чи перекиданню [1, 4]. Наукова література детально описує складні алгоритми та моделі, що лежать в основі цих систем, проте вони залишаються непридатними для модернізації застарілого автопарку через технічну складність та високу вартість.

Пасивні, або дорадчі, системи не втручаються в керування, а виконують функцію моніторингу та інформування.

Систематичний аналіз існуючих технологій ідентифікує чітку незаповнену нішу. Наукова література детально описує складні, активні та інтегровані системи [2, 5]. Водночас практично відсутні дослідження, присвячені розробці бюджетних, портативних та автономних дорадчих систем, спеціально адаптованих для умов експлуатації лісовозного транспорту. Існуючі рішення спрямовані на запобігання перекиданню через автоматичне втручання. Натомість дане дослідження фокусується на альтернативному підході: запобіганні аваріям через підвищення ситуаційної обізнаності водія та збір даних для аналізу ризиків.

Пропонований пристрій заповнює цей технологічний та економічний розрив, пропонуючи рішення для сегмента, який наразі залишається поза увагою розробників передових систем безпеки.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є проєктування, створення прототипу та емпірична валідація портативного, бюджетного пристрою для моніторингу та реєстрації кута поперечного нахилу лісовозного автомобіля в реальному часі.

Викладення основного матеріалу дослідження

Вибір апаратної бази для прототипу ґрунтувався на ключових вимогах проєкту: низька вартість, доступність компонентів, енергоефективність, портативність та можливість швидкого прототипування. Було обрано централізовану архітектуру, де мікроконтролер координує роботу всіх сенсорів та периферійних пристроїв. Специфікація апаратних компонентів пристрою наведена в таблиці 1, а архітектура пристрою – на рисунку 1.

Функціонування пристрою реалізовано у вигляді безперервного циклу. При увімкненні живлення система ініціалізує всі апаратні модулі. На початковому етапі водій через сенсорний екран може вводити вихідні параметри (наприклад, статус завантаження), на основі яких система встановлює порогові значення для попереджувальної ("жовта зона") та аварійної ("червона зона") сигналізації.

В основному циклі мікроконтролер з високою частотою опитує сенсор MPU-6050.

Таблиця 1

Основні характеристики компонентів пристрою для вимірювання кута нахилу

Компонент	Модель	Функція в системі	Обґрунтування вибору
1.Мікроконтролер	ESP32-WROOM-32	Центральна обробка, злиття даних сенсорів, керування інтерфейсом користувача, контроль запису даних	Низька вартість, висока продуктивність, вбудовані модулі Wi-Fi/Bluetooth
2.IMU-сенсор	MPU-6050	3-осьовий акселерометр та 3-осьовий гіроскоп	Перевірене бюджетне рішення для відстеження руху, достатня точність
3.GPS-модуль	NEO-6M	Надання даних про широту, довготу, висоту, швидкість та точні часові мітки для точок даних	Стандартний, надійний модуль для геоприв'язки даних
4.Зберігання даних	Модуль карти MicroSD	Реєстрація даних в універсальному форматі CSV	Просте, надійне рішення
5.Дисплей	2.8" TFT LCD	Відображення інформації для водія	Забезпечує негайний, інтуїтивно зрозумілий зворотний зв'язок для водія
6.Система оповіщення	Активний динамік	Випромінювання звукового сигналу тривоги	Надає додаткове попередження, яке неможливо пропустити
7.Джерело живлення	УМБ XO PR124 40000 mAh	Забезпечення безперервного живлення пристрою	Необхідна ємність та низька вартість
8.Візуалізація даних	kepler.gl	Візуалізація даних, зібраних пристроєм	Зручність та безкоштовний доступ

Для визначення нахилу використано дані акселерометра (лінійні прискорення по осях a_x , a_z). Значення переводяться у відносні одиниці:

$$a_x^f = \frac{a_x}{16384}, a_z^f = \frac{a_z}{16384}, \quad (1.1)$$

де 16384 – коефіцієнт нормалізації для 16-бітного виходу давача.

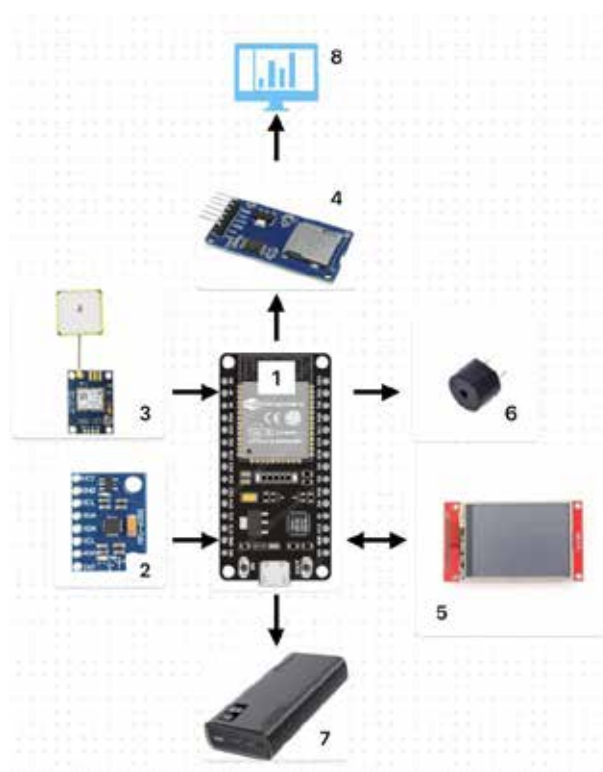


Рис. 1. Архітектура пристрою

Кут нахилу визначається як

$$\varphi = \left| \arctan \left(\frac{a_x^f}{a_z^f} \right) \right| \cdot \frac{180}{\pi}, \quad (1.2)$$

що дозволяє отримати абсолютне значення відхилення у градусах.

Для визначення критичного кута перекидання використано наступну формулу [3]:

$$\tan \beta_{\text{кр}} = \frac{2v^2 h - gB_0 R}{2ghR + B_0 v^2}, \quad (1.3)$$

де h – висота центру маси, м; v – швидкість руху автомобіля, км/год; g – прискорення вільного падіння; R – радіус повороту, м; B_0 – колія автомобіля, м.

Обчислений кут нахилу безперервно порівнюється із заданими порогами та виводиться на дисплей з кольоровою індикацією. При перевищенні порогу червоної зони система одночасно активує візуальне повідомлення на екрані та вмикає звуковий сигнал. Паралельно система формує запис, що містить часову мітку, географічні координати, висоту, швидкість та кут нахилу, і зберігає його на карту MicroSD.

Агрегація даних з кількох поїздок або від усього автопарку дозволяє виявити системні проблеми в дорожній інфраструктурі. Наприклад, якщо на певній ділянці лісової дороги постійно фіксуються небезпечні нахили у різних автомобілів, це є об'єктивним свідченням дефекту самої дороги (неправильний профіль, недостатній поперечний ухил). Такі емпіричні дані можуть слугувати вагомим аргументом для обґрунтування витрат на ремонт чи реконструкцію дороги, введення локальних обмежень швидкості або зміни маршрутів руху. Таким чином, відбувається перехід від реактивного реагування на небезпеку (попередження водія) до проактивного усунення її першопричин, що є значно ефективнішою стратегією підвищення безпеки в довгостроковій перспективі.

Для емпіричної валідації розробленого пристрою та підтвердження його практичної придатності було проведено серію польових випробувань в реальних умовах експлуатації в Бібрському лісництві Львівського надлісництва Філії “Карпатський лісовий офіс” ДП «Ліси України».

Об'єктом дослідження був лісовозний автомобіль УРАЛ-4320. Автомобіль додатково оснащений гідравлічним маніпулятором Palfinger PK 15500A. Розроблений портативний пристрій було закріплено в кабіні автомобіля (рис. 2).



Рис. 2. Лісовозний автомобіль УРАЛ-4320 та пристрій закріплений в його кабіні

Тестовий маршрут проходив по лісовій дорозі зі складним гірським рельєфом, що характеризується значними поперечними та поздовжніми ухилами, вибоїнами та коліями (рис. 3).

Було досліджено два граничні сценарії експлуатації для порівняльного аналізу – рух автомобіля без вантажу та навантаженим деревиною по тестовому маршруту.

Польові випробування згенерували два масиви геопросторових даних, що стали основою для емпіричної валідації пристрою. Для об'єктивної оцінки впливу навантаження на стійкість автомобіля було проведено порівняльний статистичний аналіз ключових параметрів (таблиця 2).

Аналіз емпіричних даних свідчить про суттєвий вплив навантаження на динамічні параметри та стійкість лісовозного автомобіля. Як видно з таблиці 2, у завантаженому стані максимальна швидкість зменшується з 18.50 до 16.41 км/год, а середня – з 8.39 до 6.25 км/год. Це зниження пов'язане зі збільшенням маси системи, що зумовлює вищі інерційні сили та потребує обережнішого режиму руху. Водночас спостерігається збільшення середнього

кута нахилу з 4.39° до 5.54° та максимального – з 15.8° до 17.8° , що вказує на підвищення впливу навантаження на положення центру мас і поведінку шасі під час руху по нерівній поверхні. Виявлена залежність демонструє, що зі зростанням маси транспортного засобу збільшується амплітуда коливань корпусу та кутів нахилу, тоді як швидкісні параметри знижуються. Отже, результати польових випробувань підтверджують, що завантаження автомобіля є визначальним фактором, який безпосередньо впливає на його динамічну стійкість та безпеку руху.



Рис. 3. Ділянки маршруту вивезення деревини в Бібрському лісництві

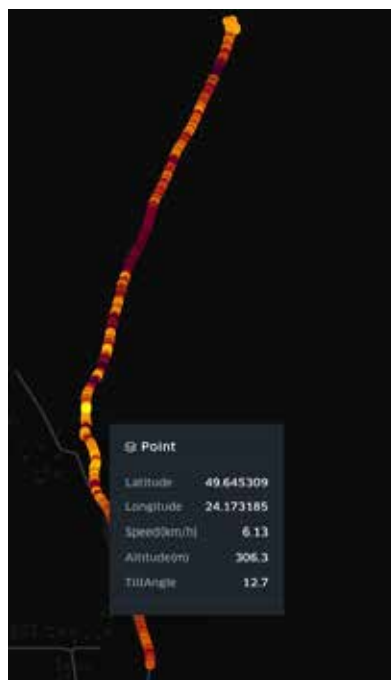


Рис. 4. Візуалізація даних маршруту вивезення деревини в Бібрському лісництві з пристрою за допомогою сервісу kepler.gl

Обґрунтування наукової цінності та практичної придатності даних – отримані під час польових випробувань дані мають як наукову, так і практичну цінність. Вони підтвердили працездатність розробленого апаратно-програмного комплексу в реальних умовах експлуатації – за наявності вібрацій, перепадів напруги та складного рельєфу, забезпечуючи точну реєстрацію ключових параметрів руху.

Таблиця 2

Порівняльна статистична характеристика параметрів руху за результатами польових випробувань

Параметр	Сценарій 1: порожній	Сценарій 2: завантажений
Кількість записів значень за один маршрут	704	788
Максимальна швидкість, км/год	18.50	16.41
Середня швидкість, км/год	8.39	6.25
Середній кут нахилу, градуси	4.39	5.54
Максимальний кут нахилу	15.8	17.8

Висновки

Дослідження підтвердило технічну можливість і практичну цінність створення недорогого пристрою для моніторингу стійкості лісовозних автомобілів. Основний науковий та практичний внесок роботи полягає в інтеграції існуючих технологій у нове прикладне рішення, що заповнює критичну нішу в забезпеченні безпеки застарілого парку лісовозної техніки.

Ключовою перевагою запропонованої системи є її подвійна функціональність. З одного боку, вона слугує як дорадча система для водія, надаючи миттєві попередження про небезпечний нахил, що дозволяє вчасно скоригувати швидкість або траєкторію руху. З іншого боку, функція геопросторової реєстрації даних перетворює пристрій на інструмент для системного аналізу ризиків, дозволяючи виявляти та картографувати небезпечні ділянки дорожньої мережі для подальшого впровадження превентивних заходів.

Розроблений пристрій успішно протестовано на лісовозі УРАЛ-4320 з маніпулятором Palfinger PK 15500A, що засвідчило його надійність і точність вимірювань.

Подальші дослідження зосереджено на вдосконаленні алгоритмів і розширенні випробувань для різних моделей лісотransпортних машин.

Список використаної літератури

1. Yue, Z., Jiangming, K., & Fenglu, L. (2017). A research of design, lateral stability and simulation for a chassis running in forest. *Croatian Journal of Forest Engineering*. Vol. 43 (2), 18–29.
2. Wang, J. S. (2011). *Effectiveness Estimation for Electronic Stability Control (ESC) and Roll Stability Control (RSC) Systems for Heavy Trucks*. (Report No. DOT HS 811 433). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.
3. Библиук Н.І. *Лісотransпортні засоби: теорія*. – Львів: "Панорама", 2004. – 253 с.
4. Palkovics, L., et al. (1998). *Roll-Over Prevention System for Commercial Vehicles*. SAE Technical Paper 982782.
5. Petersen, E., et al. (1998). *Vehicle Stability Control for Trucks and Buses*. SAE Technical Paper 982782.

References

1. Yue, Z., Jiangming, K., & Fenglu, L. (2017). A research of design, lateral stability and simulation for a chassis running in forest. *Croatian Journal of Forest Engineering*. Vol. 43 (2), 18–29.
2. Wang, J. S. (2011). *Effectiveness Estimation for Electronic Stability Control (ESC) and Roll Stability Control (RSC) Systems for Heavy Trucks*. (Report No. DOT HS 811 433). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.
3. Bybliuk, N.I. (2004). *Lisotransportni zasoby: teoriia [Forest transport vehicles: theory]*. Lviv: Panorama [in Ukrainian].
4. Palkovics, L., et al. (1998). *Roll-Over Prevention System for Commercial Vehicles*. SAE Technical Paper 982782.
5. Petersen, E., et al. (1998). *Vehicle Stability Control for Trucks and Buses*. SAE Technical Paper 982782.

Дата першого надходження рукопису до видання: 14.11.2025
 Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 11.12.2025
 Дата публікації: 31.12.2025

В. С. ВОЛОШИН

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри промислової теплоенергетики
Приазовський державний технічний університет
ORCID: 0009-0005-6809-6779

ТЕРМОДИНАМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВІДХОДОУТВОРЕННЯ В ХІМІЧНИХ ТА ПОВ'ЯЗАНИХ З НИМИ ТЕХНОЛОГІЯХ

У роботі проаналізовано термодинамічні та хімічні механізми формування промислових відходів залежно від співвідношення умов хімічної та термодинамічної рівноважностей в технологіях, пов'язаних із хімічними виробництвами. Розмежовано поняття «концептуальної» та «практичної» завершеності хімічних реакцій: перша визначає відходи, що виникають у станах хімічної нерівноважності, тоді як друга описує побічні продукти, що утворюються як невід'ємна частина самих реакцій. У межах часової інтерпретації коефіцієнта реакційної переваги K_{pref} показані можливості термодинамічної взаємодії між базовими реагентами, проміжними продуктами та компонентами, які формують початкове середовище відходоутворення. Встановлено, що незворотність хімічної реакції за умов позитивного виробництва ентропії зумовлює зміщення процесу в бік утворення побічних продуктів, тобто промислових відходів. Навіть за досягнення хімічної рівноваги така система може залишатися термодинамічно розвпорожкованою, що обмежує її здатність до мінімізації відходів. Показано, що потенціал зменшення відходоутворення пов'язаний переважно з енергетичними параметрами процесу: наявність додаткової енергії відповідної якості здатна істотно впливати на структуру потоків речовини. Зокрема, для окремих реакційних систем мінімізація відходів стає можливою за умови виконання співвідношення між базовою та додатковою енергіями $E_w^0 \leq 0,62E^0$. Саме тому контроль енергетичних потоків у реакційній системі є ключовою передумовою для зменшення масштабу створення промислових хімічних відходів. На прикладі термокаталітичного розкладання аміаку для отримання молекулярного водню продемонстровано, що залишкові кількості аміаку, характерні для процесів крекінгу та хімічної переробки, можуть бути ефективно перероблені за умов введення додаткової енергії в технологічний процес. Таким чином, інтеграція хімічних та термодинамічних підходів у проектуванні хімічних технологічних процесів створює нові можливості для мінімізації специфічних категорій промислових відходів.

Ключові слова: помислові відходи, хімічна інженерія, технологічні процеси, хімічна рівноважність, термодинамічні показники, ентропія, ентальпія, енергетичний вплив.

V. S. VOLOSHYN

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Industrial Thermal Power Engineering
Pryazovsky State Technical University
ORCID: 0009-0005-6809-6779

THERMODYNAMIC PECULIARITY OF WASTE GENERATION IN CHEMICAL AND RELATED TECHNOLOGIES

This study analyzes the thermodynamic and chemical mechanisms underlying the formation of industrial waste, focusing on their dependence on the balance between chemical and thermodynamic equilibrium in technologies associated with chemical production. The distinction between the “conceptual” and “practical” completeness of chemical reactions is clarified: the former relates to waste generated under chemically nonequilibrium conditions, whereas the latter refers to by-products inherently formed as part of the reactions themselves. Within the temporal interpretation of the reaction preference coefficient K_{pref} , the study demonstrates the potential for thermodynamic interactions among primary reactants, intermediate products, and components that constitute the initial environment of waste formation. It is established that the irreversibility of a chemical reaction under conditions of positive entropy production shifts the process toward the formation of by-products, i.e., industrial waste. Even at chemical equilibrium, the system may remain thermodynamically disordered, which limits its capacity to minimize waste generation. The results show that the potential for reducing waste is primarily governed by the energetic characteristics of the process: the presence of additional energy of appropriate quality can significantly influence the structure of material flows. For specific reaction systems, waste minimization becomes feasible when the ratio between baseline and additional energy satisfies the condition $E_w^0 \leq 0,62E^0$. Consequently, the control of energy fluxes within the reaction system is a key prerequisite for reducing the scale of

industrial chemical waste. Using thermocatalytic ammonia decomposition for molecular hydrogen production as an illustrative example, the study demonstrates that residual amounts of ammonia characteristic of cracking and chemical processing can be efficiently converted when supplementary energy is introduced into the system. Thus, the integration of chemical and thermodynamic approaches in the design of chemical technological processes creates new opportunities for minimizing specific categories of industrial waste.

Key words: waste management, chemical engineering, technological processes, chemical equilibrium, thermodynamic indicators, entropy, enthalpy, energy impact.

Постановка проблеми

Відходоутворення в хімічних процесах, що мають місто в багатьох виробничих системах, виглядає як специфічне явище, що має особливі закони, за якими формується перелік таких відходів. Специфіка такого відходоутворення полягає в створенні відходів, не як механічної або іншої похідної компонентів початкової сировини, а як продукт хімічної реакції з зовсім іншими властивостями, не співпадаючими з властивостями вихідних компонентів. Дослідження таких відходів має особливі механізми та мають вивчатися сукупно з позицій хіміко-термодинамічних поглядів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як правило, в результаті реакції атоми первинних реагентів в хімічних реакціях перерозподіляються, утворюючи нові речовини, несхожі на сировинні [1]. Це класичне визначення дає уявлення про об'єктивні механізми, що лежать в основі хімічних перетворень та є незмінною частиною таких реакцій. Відповідно до специфіки нашого дослідження, уточнимо формулювання поняття «хімічна реакція», включивши до неї розділене поняття продукту та відходу та їх відношення до термодинаміки таких процесів. На кшталт, «хімічна реакція», це процес перетворення вихідних реагентів, що супроводжується розривом та утворенням нових хімічних зв'язків, які змінюють склад і будову реагентів, та призводять до утворення нових, як *корисних (основних)*, так і *побічних речовин* [2].

Матеріальні потоки та термодинамічні сили, що їх зумовлюють, перебувають у стані взаємної симетричної відповідності. Згідно з принципом П. Кюрі, застосованим у подальших роботах І. Пригожина [3], макроскопічні причини не можуть мати більшої кількості елементів симетрії, ніж наслідки, які вони породжують; інакше кажучи, симетрія дії не перевищує симетрії причини. Це положення безпосередньо стосується хімічних реакцій, що лежать в основі більшості технологічних процесів, оскільки саме узгодженість симетрій визначає можливість виникнення або заборону певних напрямків матеріальних потоків у реакційній системі. Це зауваження є суттєвим для оцінки коректності лінійних наближень нерівноважної термодинаміки, зокрема – для застосування онсагерівських співвідношень. У цьому контексті феноменологічні коефіцієнти (L_{ij}, λ) у рівняннях Л. Онсагера, які встановлюють лінійний зв'язок між матеріальними потоками та термодинамічними силами, повинні інтерпретуватися з урахуванням типу взаємодій, що розглядаються. Зокрема, їхня форма та допустимі значення залежать від того, чи є відповідні потоки та сили скалярними, векторними або тензорними величинами. Правильне визначення симетрій цих величин гарантує узгодженість онсагерівських коефіцієнтів із загальною структурою незворотних процесів і забезпечує фізичну коректність рівнянь лінійної нерівноважної термодинаміки [4, 5].

У загальному сенсі в хімічних технологіях може розглядатися ситуація, за якої в системі встановлюються механічна та термодинамічна (теплова) рівновага. Механічна рівновага усуває можливість зростання ентропії, пов'язаного з в'язкою плинними або іншими макроскопічними рухами середовища. Термодинамічна (теплова) рівновага, у свою чергу, виключає ентропійний приріст, обумовлений процесами теплопередачі між областями з різною температурою. Такий стан є аналогом дифузійної рівноваги, за якого зростання ентропії в системі зумовлюється виключно перебігом хімічних реакцій, масоперенесенням між фазами або будь-яким іншим процесом, що може бути формально описаний через координату реакції [6, 7]. На практиці ці обмеження часто вважають другорядними: хімічну нерівноважність приймають як параметр, що безпосередньо визначає зміну ентропії системи і, згідно з подальшими висновками, є функціонально залежною від ступеня її термодинамічної нерівноважності.

Формулювання мети досліджень

Визначення закономірностей і причин появи специфічної форми відходів у хімічних технологіях та способів їх мінімізації у джерелі виникнення, технологічному процесі.

Викладення основного матеріалу дослідження

Хімічну реакцію в контексті технологічного процесу доцільно розглядати не лише як формальний набір стехіометричних рівнянь, а як цілісну систему, у якій виявляється структурна двоєдність між частиною компонентів, що безпосередньо спрямована на формування цільового продукту, та підмножиною нових речовин, які утворюються як побічні продукти і фактично становлять основу хімічних технологічних відходів. Згідно з сучасними термодинамічними підходами, реакційний процес може бути охарактеризований як «концептуально» завершений або «практично» завершений [8]. У першому випадку хімічна рівновага формально зміщена у бік продуктів (включаючи побічні), однак повне перетворення реагентів не відбувається через фазові обмеження, кінетичні бар'єри або топологічні властивості реакційного середовища. Така система мінімізує вільну енергію

лише в межах допустимих мікроструктурних конфігурацій. Натомість «практично» завершена реакція характеризується повною або майже повною витратою вихідних реагентів і досягненням глобального мінімуму вільної енергії Гіббса за фіксованих температури та тиску. У цьому випадку рівновага має не лише формальний, але й матеріально завершений характер, що відповідає максимальній доступній реалізації хімічного потенціалу реагентів. Відмінність між цими двома режимами дозволяє кількісно описати своєрідну хімічну двоєдиність – на відміну від термодинамічної двоєдиності, яка стосується балансу енергетичних та ентропійних тенденцій у системі. Така хімічна двоєдиність може бути формалізована через енергетичну та статистичну взаємодію двох підмножин реагентів:

- підмножина J_0 , що бере участь у формуванні цільового продукту;
- підмножина J_w , що залучена в альтернативні канали перетворення й утворює побічні реакції.

Розподіл між цими підмножинами можна інтерпретувати як ентропійно детермінований розподіл реактивностей, що відображає ступінь конкуренції між доступними реакційними шляхами. Відповідно, утворення побічних продуктів є не лише функцією хімічної кінетики, а й результатом статистичного розподілу мікроскопічних станів, доступних системі за заданих енергетичних умов. У цьому сенсі конкуренція реакційних каналів виступає фундаментальним фактором, що визначає частку промислових хімічних відходів у технологічному процесі. Як пропонується варіативний параметр для цього можна використовувати коефіцієнт реакційної переваги [9]

$$K_{pref} = \frac{\sum_{i \in P} k_i [R_i]}{\sum_{j \in B} k_j [R_j]} \quad (1)$$

де: P – множинність реакцій, що ведуть до цільового продукту; B – множинність побічних реакцій; k_i та k_j – константи швидкості цих реакцій; $[R_i]$ та $[R_j]$ – концентрації відповідних реагентів. Якщо $K_{pref} > 1$, реакційна система тяжіє до основного продукту. Якщо $K_{pref} < 1$, система йде в напрямку побічних продуктів. При термодинамічній рівновазі (eq) система досягає мінімуму вільної енергії Гіббса: $\Delta G_{syst} \rightarrow 0$. Відношення концентрацій продуктів та реагентів визначимо рівнянням:

$$K_{eq} = \frac{\prod [P]^{v_P}}{\prod [R]^{v_R}} \quad (2)$$

Побічні продукти також входять до загальної рівноваги, формуючи множинність можливих рівноважних точок – особливо у багатостадійних реакціях. Тут двоєдиність можна інтерпретувати як розподіл повної вільної енергії Гіббса на дві підсистеми, з можливістю локальних мінімумів кожної.

При термодинамічній нерівноважності ($pref$) пошлемося на ентропійне виробництво $\Delta S = \sum J_i X_i$ де J_i – матеріальний потік; X_i – термодинамічна сила. Побічні хімічні реакції можуть розглядатися тут як «загублення» енергії або речовини, що відхиляють систему від основного каналу, знижуючи її ефективність. У цьому контексті параметр K_{pref} можна розширити до часової функції, яка залежить від динаміки:

$$K_{pref} = \frac{\sum_{i \in P} r_i(t)}{\sum_{j \in B} r_j(t)}, \quad (3)$$

де $r(t)$ – поточна швидкість реакції.

Розглянемо узагальнені математичні залежності для опису зв'язків між хімічним потенціалом, хімічною спорідненістю та зміною ентропії (як міри розпорядження) у хімічній термодинаміці [10]. Кожен із зазначених параметрів має здатність впливати на стан сировинних компонентів хімічної реакції і в тому числі на ті, з яких відбуваються хімічні відходи (табл. 1).

З позицій формування хімічних відходів, хімічний потенціал i -го компонента (μ_i) визначає його внесок у повну вільну енергію системи та виступає рушійною силою хімічних реакцій і дифузійних процесів. Усі процеси, що відводять систему від хімічної рівноваги, включно з побічними реакціями, спрямовані у бік зменшення Гіббсової енергії за рахунок відповідних градієнтів (μ_i). Хімічна спорідненість реакції ($A = -\sum \nu_i \mu_i$) характеризує таку ступінь відхилення реакційної системи від стану рівноваги. Для реакції загального вигляду $\sum \nu_i B_i = 0$ у рівновазі виконується умова $A=0$, а за $A>0$ реакція протікає у прямому напрямку. Спорідненість безпосередньо пов'язана зі зміною вільної енергії Гіббса: $A = -\Delta G = -\sum \nu_i \mu_i$. Зміна ентропії (ΔS) є мірою неупорядкованості та відображає незворотність хімічних і транспортних процесів. Повний ентропійний баланс системи й надсистеми описується як $dS_{total} = dS_{syst} + dS_{sub} \geq 0$. Для хімічних процесів та їх відходів ентропія системи змінюється за рахунок теплового ефекту реакції та внутрішніх незворотних процесів $dS_{syst} = \frac{\delta Q}{T} + dS_{irr}$, де $dS_{irr} \geq 0$ характеризує внесок власне хімічної незворотності (реакцій, дифузії, релаксаційних процесів). Таким чином, формування

побічних продуктів та хімічних відходів визначається одночасно змінами хімічних потенціалів і зростанням ентропії внаслідок незворотних внутрішніх перетворень.

Таблиця 1

Базові залежності щодо визначення параметрів взаємовідношення термодинамічної та хімічної рівноваги

Показники, співвідношення та означення	Математичний вираз
Зв'язок хімічного потенціалу (μ_i) з ентропією та термодинамічним потенціалом (G).	$dG = -SdT + VdP + \sum \mu_i dN_i$. $\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln c_i$
Швидкість виробництва ентропії (ξ – ступінь просування реакції; А-хімічна спорідненість)	$\delta S = \frac{A}{T} v \geq 0$, $v = \frac{d\xi}{dt}$
Зміна вільної енергії Гіббса, як термодинамічного потенціалу (ΔH_{sys} – зміна ентальпії системи;)	$\Delta G = -TdS_{\text{sys}} + \Delta H_{\text{sys}}$
Зв'язок хімічних потоків (J_i) та термодинамічних сил (X_i) з ентропією системи через рівняння Онсагера	$\Delta S = \sum J_i X_i = \sum L_{ij} X_i X_j \geq 0$

В якості додаткових параметрів, що надають опосередкований вплив на процеси хімічного відходоутворення, приймемо (див. табл. 1):

- термодинамічний потенціал у вигляді зміни вільної енергії Гіббса ΔG . Він часто використовується в хімічній термодинаміці, так як зручний для дослідження систем при постійних Т і Р;
- швидкість хімічної реакції (v), що визначає потік речовини в хімічній реакції, пов'язаний із спорідненістю реагентів у напрямку отримання основного результату або хімічного відходу;
- матеріальні потоки (J_i) та термодинамічні сили (X_i), вони використовуються в нерівноважній термодинаміці для опису дифузії, хімічних реакцій та інших супутніх процесів.

Якщо хімічна реакція незворотна, а виробництво ентропії позитивне, це відбиває зростання розвпорядкування і зсув реакції у бік отримання побічних продуктів [11]. Для нашого випадку це відходи хімічних реакцій у технологічних процесах, пов'язаних саме з хімічними перетвореннями.

Розглянемо докладніше процеси відходоутворення на прикладі термодинамічних реакцій розкладання аміаку в технологіях отримання молекулярного водню [12, 13]. Загальні відходи, що супроводжують технологію крекінга та хімічної переробки аміаку надані в таблиці 2. З цих позицій не викликає сумнів, що крекінгова технологія переробки аміаку з отриманням водню, як компонентно, майже моносировинна, теоретично здатна самостійно справлятися з відходами саме у межах технологічного процесу. Навіть відходи залишків аміаку післяексплуатаційного періоду, здатні перероблятися в рамках технологічного процесу. На це показує і динаміка змін у розвитку цього небезпечного сегменту відходоутворення.

Таблиця 2

Загальна характеристика промислових відходів, що супроводжують технологію переробки аміаку (*-небезпечні відходи)

Показник, характеристика відходу	Назва відходу				
	Відпрацьовані каталізatori	Залишки NH_3	Матеріали носія каталізатора	Вода забруднена	Шлам
Класифікатор відходу	13 05 08*	16 05 04*	13 05 07	16 10 02	19 08 05*
Кількість створеного відходу, т/т сировини	0,001	0,05 m^3	0,0005	0,01 m^3	0,02
Кількість відходів, відхилених у технологічному процесі т/т сировини	-	-	0,0005	0,01 m^3	0,02
Засоби рециклінгу відхода	Відновлення металів	Захоплення, нейтралізація	Поховання, з точки зору використання у будівництві	Очистка стічних вод	Зневоднення, спалювання
Кількість переробленого відходу, т/т сиров.	0,0008	0,045	0,0003	0,009	0,0005
Кількість відходів, що належать до довгострокового зберігання, т/т.	0,0002	0,005	0,0002	0,001	0,0015

На рис. 1 представлена модель термодинамічного розкладання аміаку на платиновому каталізаторі з акцентом на термодинамічну двоєдиність, нерівноважну кінетику, тепловий баланс та побічні продукти. Схема ілюструє можливості управління хімічно рівноважним станом розкладання аміаку на основі платинового каталізатора за допомогою термодинамічних обмежень. Базова реакція $NH_3 \leftrightarrow N_2 + H_2$ є оборотною, положення рівноважності

залежить від температури: від "low T" до "High T". При високих температурах, за принципом Ле Шательє, рівновага зміщується у бік розкладання аміаку. Загальні енергетичні витрати на реалізацію технологічного процесу становлять $E_0 = 2,168$ ГДж/т вихідного NH_3 [14]. Основний продукт "P" – водень. У разі корисна робота пов'язані з енергією, запасеною у продукті – водні (H_2) і становить $W_p \approx 1,790$ МДж/т NH_3 [15].

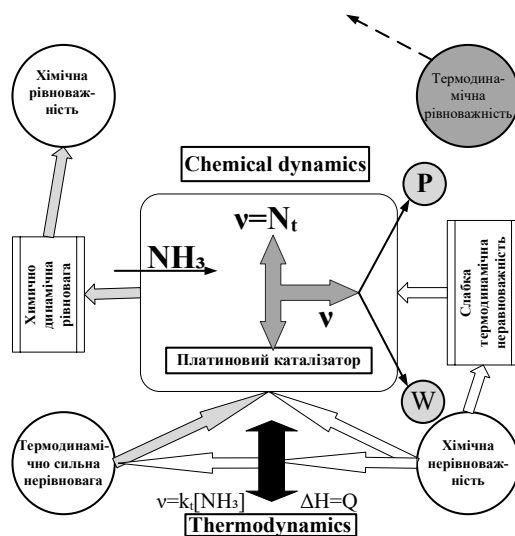


Рис. 1. Відношення між хімічною та термодинамічною рівноважністю в рамках термодинамічної двоєдності в електрохімічних реакціях розкладання аміаку

Побічні продукти "W" – аміак, що не встиг розкластися або N_2 , не повністю відокремлений. Вони розглядаються в рамках відхилення від термодинамічного оптимуму як технологічні відходи. Аміак (NH_3), що залишився, утворюється через неповне розкладання, пов'язане з кінетичними обмеженнями, недостатньою температурою або часом контакту з каталізатором. Не повністю відокремлений азот (N_2) залишається в суміші через недосконалу сепарацію газів або низьку селективність процесу.

Зміна ентропії (ΔS_0) технологічного процесу складається з ентропії хімічної реакції та ентропії, пов'язаної з нагріванням і тепловими втратами. Для стандартної молярної ентропії послідовно $NH_{3(z)} = 192,45$; $N_{2(z)} = 191,61$; $H_{2(z)} = 130,68$. Розрахункове зміння ентропії реакції склало $\Delta S_R = 0,5844$ кДж/(моль · К). Зміна ентропії, що пов'язана з нагрівом $\Delta S_n = 0,8445$ кДж/(моль · К). Зміна ентропії від теплових втрат $\Delta S_v = 0,5025$ кДж/(моль · К). Сумарна зміна ентропії для стандартного технологічного процесу складає $\Delta S_0 = 1,931$ кДж/(моль · К). Швидкість зміни ентропії визначається як $\delta S_0 = \frac{d(\Delta S_0)}{dt}$, кДж/(моль · К · с), а наведена швидкість $\delta S_0 / E_0$ вимірюється в 1/(моль · К · с).

Найпростіший спосіб мінімізації хімічних відходів може передбачати введення додаткової теплової енергії E_w^0 , що може призвести до умови $NH_{3(w)} \rightarrow 0$. Другий з можливих напрямів мінімізації залишкового аміаку, це управління тиском у зоні реакції (рівновага реакції зсувається вправо. Необхідна енергія E_w^0 витрачається для підтримки низького тиску (вакуумні насоси).

До технологічних відходів у цій системі відносяться втрата терміну служби платинового каталізатора, отруєного домішками (0,1-1,0 Pt/т NH_3). Хімічна регенерація платини (промивання кислотами, відновлення у водні) або переробка відпрацьованого каталізатора для вилучення Pt також вимагає додаткової енергії, але вона вже ніяк не пов'язана з власне технологічним процесом. Відомі енерговитрати такі: $\sim 50 \div 100$ МДж/кг каталізатора (на регенерацію та переробку) з ефектом зниження відходів платини на $70 \div 90\%$, що становить не менше 0.01 г/т NH_3 .

Теплові втрати внаслідок протікання ендотермічної реакції можуть становити до 20-30% вхідної енергії. Відходи тут, це непрямі викиди CO_2 , якщо нагрівання здійснюється викопним паливом.

Крім того, використані адсорбенти (наприклад цеоліти) або розчини для уловлювання залишкового NH_3 представляють також специфічні технологічні відходи у вигляді відпрацьованих матеріалів у кількості 0.1-0.5 кг адсорбенту/т NH_3 . Їх термічна або вакуумна регенерація вимагає додаткової зовнішньої енергії у розмірі $E_w^0 = 0,03 \div 0,06$ МДж/т NH_3 , але вже поза самим технологічним процесом. При цьому зниження відходів адсорбентів може бути забезпечене до 0.1 кг/т NH_3 .

Таким чином, теоретично, сумарна додаткова зовнішня енергія для мінімізації хімічних та технологічних відходів у термокаталітичному розкладанні аміаку потенційно може перебувати в межах $E_w^0 = 0,98 \div 1,57$ МДж/т

NH_3 , тобто $E_w^0 = (0,438 \div 0,696) E_0$ з ефектом по хімічних відходах $NH_3 < 0.05\%$, $N_2 < 0.01\%$. Однак найпростіший аналіз співвідношень умов хімічної та термодинамічної рівноваги дають більш обережніший результат, який враховується при введенні додаткової енергії в зону хімічної реакції.

Базова енергія в межах $E_0 = 2,186 \text{ МДж/т } NH_3$ забезпечує мінімально можливу хімічну рівновагу системи (рис. 2), при одночасному стані слабкої термодинамічної нерівноважності. Введення в систему додаткової, певним чином структурованої енергії E_w^0 в межах $0,98 \text{ МДж/т} < E_w^0 < 1,355 \text{ МДж/т}$, тобто, коли $E_w^0 = (0,438 \div 0,62) E_0$ вводить систему в явну термодинамічно сильну нерівновагу (див. рис. 2). Це сприяє введенню інших механізмів зниження залишкових відходів від неповного розкладання аміаку NH_3 та неповністю відокремленого азоту N_2 , а саме, шляхом підвищення температури в зоні каталітичної реакції, збільшення часу контакту з каталізатором, а також підтриманням мінімального тиску в зоні реакції в межах $0,1 \div 1,0 \text{ атм}$. При цьому швидкість зміни ентропії як показника стійкості системи стабілізується і навіть здатна до зменшення, порівняно з традиційним хімічним процесом (див. рис. 2).

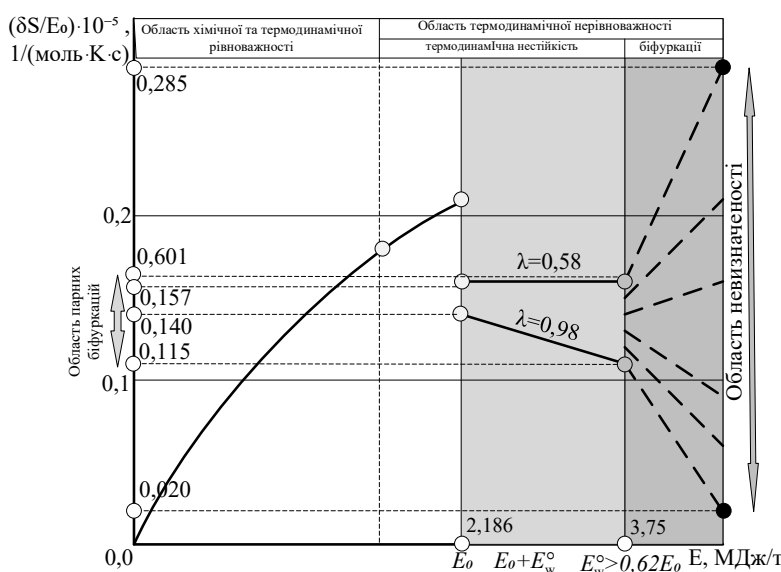


Рис. 2. Зміна термодинамічних параметрів системи під час введення додаткової енергії

Розрахунки показують, що введення додаткової енергії в розмірах $E_w^0 > 1,355 \text{ МДж/т}$, тобто $0,62 E_0 < E_w^0 < 0,696 E_0$ вводить систему до стану, близькому до хаосу, про що свідчить неконтрольоване розсіювання даних за швидкістю зміни ентропії, при умовах, коли виробнича система перестає функціонувати. Хімічна рівновага тут існує, як потенційний стан системи, при якому швидкість розділення аміаку вирівнюється зі швидкістю його зворотного синтезу, та може бути компенсовано постійним виносом азоту та водню з зони реакції. Але, в будь-якому випадку, хімічна рівноважність в динаміці, коли присутній приплив вихідних компонентів та відтік результативних компонентів, відповідає стану термодинамічної нерівноважності [16] та вимушує бути обережними з використанням E_w^0 . І навпаки, термодинамічній рівновазі в обов'язковому порядку повинна відповідати хімічна рівновага, що накладає умови для використання E_w^0 .

Таким чином, стан системної термодинамічної нерівноважності здатний забезпечити:

- видалення продуктів N_2 та H_2 з реакційної зони;
- попередження появи побічних реакцій (наприклад, утворення нітридів або часткова окислювальна конверсія);
- температурні градієнти та вплив на розподіл ентальпії.

Повторимо, що це стає можливим тільки при обережному введенні в систему термокаталітичного розкладання аміаку додаткової енергії E_w^0 певної якості, яка сприятиме мінімізації хімічних відходів NH_3 та N_2 . Забезпечення зростання температури до $T_w^0 = 1073 \div 1123 \text{ К}$ з урахуванням теплоти реакції та ККД нагріву $\sim 80\%$, дозволить збільшити конверсію NH_3 до розрахункових $99.5 \div 99.9\%$, зниження залишкового аміаку до розрахункових менш $0,1\%$ у вихідній суміші та зниження азоту, що має бути невиведеним до нормативів.

Висновки

1. Специфіка походження промислових відходів у хімічних технологічних процесах декілька відрізняється від аналогічних механізмів, притаманних іншим технологіям. Такі відходи, як правило, мають властивості не

первинної сировини, а принципово інших речовин, які створені завдяки діям хімічних сил атомарного рівня, що мають місто у хімічних реакціях.

2. Наведено, що механізм створення таких промислових відходів залежить від співвідношення умов хімічної та термодинамічної рівноважності. Механізми «концептуальної» та «практичної» завершеності хімічної реакції послідовно відносяться до різних сторін таких рівноважностей, де перша з них показує на побочні продукти, що створюються у станах нерівноважності хімічних реакцій, а друга – пов'язана з кінцевими продуктами самих цих реакцій, у стані наближеному до термодинамічної рівноваги.

3. Термодинамічні умови, а саме існування додаткової енергії потрібної якості в хімічному процесі може стати основою для мінімізації хімічних відходів, якщо виконуються умови співвідношення між додатковою та базовою енергіями в пропорції $E_w^0 \leq 0,62 \cdot E^0$.

Список використаної літератури

1. Daintith J. A. Dictionary of Chemistry (6th ed.), Oxford University Press, 2008. 592 p.
2. Cafiero LM., Angelis D., Tuccinardi L., Tuffi R. Current State of Chemical Recycling of Plastic Waste: A Focus on the Italian Experience. Sustainability. 17 (3), ENEA- Casaccia Research Centre, 2025. pp. 143-159
3. Prigogine I. Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes, 1967, New York, Interscience, P. 45-67.
4. Волошин В. С. Відходи та їх природа. СПД Самченко, Київ-Маріуполь, 2024. 660 с.
5. Prigogine I., Defay R. Chemical Thermodynamics. Longmans, 1967. 543 p.
6. Atkins P., de Paula J. Physical Chemistry. Oxford, Oxford University Press, 2006. P. 123-156.
7. Hill T.L. An Introduction to Statistical Thermodynamics. New York, Dover Publications, 1986. P. 134-165.
8. Ciccioli A. Are all chemical reactions in principle reversible? Thermodynamic distinction between “ conceptually complete ” and “ practically complete ” reactions. Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics, 2023. P. 172-189. – <https://doi.org/10.1515/jnet-2022-0044>
9. Garhyan P. Elnashaie S. Conservation Equations and Modeling of Chemical and Biochemical Processes. Taylor and Francis Group, 2003. 630 p.
10. Ott J. B., Boerio-Goates J. Chemical Thermodynamics: Advanced Applications. Elsevier Science & Technology Books, 2000. 437 p.
11. Lucentini I., García Colli G., Luzi C., Serrano I., Soler L., Divins N. J., Martínez O. M., Llorca J. Review of the decomposition of ammonia to generate hydrogen. Industrial & Engineering Chemistry Research, 60, 2012. P. 18560–18611. – <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c00843>
12. Valera-Medina A., Amer-Hatem F., Azad A. K. et. Review on ammonia as a potential fuel: from synthesis to economics. Energy & Fuels, 35(9), 2021. P. 6964–7029. – <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c03685>.
13. Sun S., Jiang Q., Zhao D. et. Ammonia as hydrogen carrier: Advances in ammonia decomposition catalysts for promising hydrogen production. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 169, 2022. – <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112918>.
14. Appl M. Ammonia: Principles and Industrial Practice. Wiley -VCH, 1999. 310 p.
15. Haber F., Bosch C. The Synthesis of Ammonia from its Elements. Springer, 1910.
16. Sabatini A., https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Marco-Borsari-40090508?_sg%5B0%5D=JZE2MJyUIUL8L4Og6bPjE0BHFUWIU3Vvmg-e2qsq6dvi07kgTksKm99EYUpbqNjuvYC2Gh8.1R1XV3fAvfGgDNTQk9Bgwk1YJ9rYtqk9jkjQW4FpM26zJwhHLto-pWG2gPLena6Oj1kHe-jUH8QgSOtUEa0A&_sg%5B1%5D=mxumUzaf147zPA7k13EHvf06wqQR_WkSnSwxxopXr5ZvwbU8Y6whrj1ml_S_FQ8Tlf3IHnk.77TbdEaqwRGOH5EUSJ6ONaaxL94zP04rzPAROm3emq2zjJ8aNSMyVsbzOmprKbBytaxRZOJ8gSTKLcNpJ4Adxw&_tp=eyJjb250ZXh0Ijpw7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxyY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxyY2F0aW9uIiwicG9zaXRpb24iOiJwYWdlSGVhZGVyInB1Borsari https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Marco-Borsari-40090508?_sg%5B0%5D=JZE2MJyUIUL8L4Og6bPjE0BHFUWIU3Vvmg-e2qsq6dvi07kgTksKm99EYUpbqNjuvYC2Gh8.1R1XV3fAvfGgDNTQk9Bgwk1YJ9rYtqk9jkjQW4FpM26zJwhHLto-pWG2gPLena6Oj1kHe-jUH8QgSOtUEa0A&_sg%5B1%5D=mxumUzaf147zPA7k13EHvf06wqQR_WkSnSwxxopXr5ZvwbU8Y6whrj1ml_S_FQ8Tlf3IHnk.77TbdEaqwRGOH5EUSJ6ONaaxL94zP04rzPAROm3emq2zjJ8aNSMyVsbzOmprKbBytaxRZOJ8gSTKLcNpJ4Adxw&_tp=eyJjb250ZXh0Ijpw7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxyY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxyY2F0aW9uIiwicG9zaXRpb24iOiJwYWdlSGVhZGVyInB1Borsari Chemical and Biochemical Thermodynamics Reunification. Chemistry International, 41 (2), 2021. P.243-2528. <https://doi.org/10.1515/pac-2019-0908>

References

1. Daintith J. A. (2008) Dictionary of Chemistry (6th ed.), Oxford University Press., 592 p.
2. Cafiero LM., Angelis D., Tuccinardi L., Tuffi R. (2025) Current State of Chemical Recycling of Plastic Waste: A Focus on the Italian Experience. Sustainability. ENEA- Casaccia Research Centre. no. 17 (3),. pp. 143-159
3. Prigogine I. (1967) Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes,, New York, Interscience, pp. 45-67.

4. Voloshyn V.S. (2024) Vidchody ta ih priroda [Waste and its nature] Kyiv-Mariupol, SPD Samchenko, (in Ukraine).
5. Prigogine I., Defay R. (1967) Chemical Thermodynamics. Longmans, 543 p.
6. Atkins P., de Paula J. (2006) Physical Chemistry. Oxford, Oxford University Press, pp. 123-156.
7. Hill T.L. (1986) An Introduction to Statistical Thermodynamics. New York, Dover Publications, pp. 134-165.
8. Ciccio A. (2023) Are all chemical reactions in principle reversible? Thermodynamic distinction between “ conceptually complete ” and “ practically complete ” reactions. Journal of Non-Equilibrium Thermodynamics, pp. 172-189.
9. Garhyan P. Elnashaie S. (2003) Conservation Equations and Modeling of Chemical and Biochemical Processes. Taylor and Francis Group, 630 p.
10. Ott J. B., Boerio-Goates J. (2000) Chemical Thermodynamics: Advanced Applications. Elsevier Science & Technology Books, 437 p.
11. Lucentini I., García Colli G., Luzi C., Serrano I., Soler L., Divins N. J., Martínez O. M., Llorca J. (2012) Review of the decomposition of ammonia to generate hydrogen. Industrial & Engineering Chemistry Research, no. 60, pp. 18560–18611.
12. Valera-Medina A., Amer-Hatem F., Azad A. K. et. (2021) Review on ammonia as a potential fuel: from synthesis to economics. Energy & Fuels, no. 35(9), pp. 6964–7029.
13. Sun S., Jiang Q., Zhao D. et. (2022) Ammonia as hydrogen carrier: Advances in ammonia decomposition catalysts for promising hydrogen production. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 169 p.
14. Appl M. (1999) Ammonia: Principles and Industrial Practice. Wiley -VCH, 310 p.
15. Haber F., Bosch C. (1910) The Synthesis of Ammonia from its Elements. Springer. (unpublished).
16. Sabatini A., [https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Marco-Borsari-40090508?_sg%5B0%5D=JZE2MJyUIUL8L4Og6bPjE0BHFUWIU3Vvmg-e2qsq6dvi07kgTksKm99EYUpbqNjuvYC2Gh8.1R1XV3fAvfGgDNTQk9Bgwk1YJ9rYtqk9jkjQW4FpM26zJwhHLto-pWG2gPLena6Oj1kHe-jUHu8QgSOtUEa0A&_sg%5B1%5D=mxumUzaf147zPA7k13EHvf06wqQR_WkSnSwxxopXr5ZvwbU8Y6whrj1ml_S_FQ8Tlf3IHnk.77TbdEaqwRGOH5EUSJ6ONaaxL94zP04rzPAROm3emq2zjJ8aNSMyVsbzOmprKbBytaxRZOJ8gSTKLcNpJ4Adxw&_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmtpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmtpY2F0aW9uIiwicG9zaXRpb24iOiJwYWdlSGVhZGVyIn19M.](https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Marco-Borsari-40090508?_sg%5B0%5D=JZE2MJyUIUL8L4Og6bPjE0BHFUWIU3Vvmg-e2qsq6dvi07kgTksKm99EYUpbqNjuvYC2Gh8.1R1XV3fAvfGgDNTQk9Bgwk1YJ9rYtqk9jkjQW4FpM26zJwhHLto-pWG2gPLena6Oj1kHe-jUHu8QgSOtUEa0A&_sg%5B1%5D=mxumUzaf147zPA7k13EHvf06wqQR_WkSnSwxxopXr5ZvwbU8Y6whrj1ml_S_FQ8Tlf3IHnk.77TbdEaqwRGOH5EUSJ6ONaaxL94zP04rzPAROm3emq2zjJ8aNSMyVsbzOmprKbBytaxRZOJ8gSTKLcNpJ4Adxw&_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmtpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmtpY2F0aW9uIiwicG9zaXRpb24iOiJwYWdlSGVhZGVyIn19Borsari) (2021) Chemical and Biochemical Thermodynamics Reunification. Chemistry International, no. 41 (2), pp. 243-2528.

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 18.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

С. В. ГАЙДУКЕВИЧстарший викладач кафедри електротехнологій
та експлуатації енергообладнання
Відокремлений підрозділНаціонального університету біоресурсів і природокористування України
«Бережанський агротехнічний інститут»

ORCID: 0000-0001-5910-5921

Н. П. СЕМЕНОВАстарший викладач кафедри електротехнологій
та експлуатації енергообладнання
Відокремлений підрозділНаціонального університету біоресурсів і природокористування України
«Бережанський агротехнічний інститут»

ORCID: 0000-0002-8478-9429

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ, КЕРУВАННЯ ТА ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ПРИВОДУ ЕКСТРУДЕРА

В статті представлено розробку інтелектуальної системи контролю, керування та захисту асинхронних електродвигунів, зокрема приводу головного робочого органу (шнека) екструдера, що працює у важких експлуатаційних умовах із суттєвими динамічними коливаннями навантаження протягом усього технологічного циклу. Запропонована система забезпечує адаптивне коригування режимів роботи електроприводу відповідно до періодичних змін технологічного навантаження, а також здатна безперервно вимірювати й моніторити контрольовані електричні параметри (струм, напруга, частота, температура обмоток і корпусу, крутний момент) для оцінювання технічного стану електродвигуна в процесі роботи та своєчасного виявлення передаварійних ситуацій, що можуть привести до виходу з ладу. Реалізація такого підходу підвищує надійність захисту електродвигунів, сприяє зниженню експлуатаційних втрат, підвищенню енергоефективності та продовженню ресурсу їх роботи.

Розроблена інтелектуальна система контролю, керування та захисту асинхронних електродвигунів, розглянута на прикладі приводу головного робочого органу екструдера для виробництва кормових сумішей і харчових продуктів, базується на впровадженні інноваційних рішень та реалізації концепцій інформаційних технологій, інтелектуального аналізу даних та методів технічної діагностики. Ця система, завдяки реалізації алгоритмів штучного інтелекту та математичних моделей, забезпечує аналіз тенденцій зміни параметрів та, окрім безперервного контролю і моніторингу реальних контрольованих параметрів, здатна оцінювати аварійні ситуації, своєчасно реагувати на них і передавати відповідну інформацію до функціональних блоків найвищого рівня керування.

Запропонована інтелектуальна система поєднує елементи традиційної автоматики з алгоритмами аналітичної обробки даних та сучасними методами діагностики технічного стану, що забезпечує комплексну оцінку надійної роботи електричних машин в процесі виконання заданих функцій.

Впровадження запропонованої інтелектуальної системи забезпечує не лише ефективну експлуатацію електроприводу, але й сприяє переходу автоматизації технологічного процесу екструдювання на вищий рівень, що підтверджує практичну значущість та актуальність проведеного дослідження.

Ключові слова: інтелектуальна система, надійність, превентивний захист, електродвигун, екструдер.

S. V. HAIDUKEVYCHSenior Lecturer at the Department of Electrical Technology
and Operation of Power Equipment

Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine "Berezhany Agrotechnical Institute"

ORCID: 0000-0001-5910-5921

N. P. SEMENOVASenior Lecturer at the Department of Electrical Technology
and Operation of Power Equipment

Separated Subdivision of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine "Berezhany Agrotechnical Institute"

ORCID: 0000-0002-8478-9429

INTELLIGENT SYSTEM FOR CONTROL, MANAGEMENT AND PROTECTION OF THE EXTRUDER DRIVE MOTOR

The article presents the development of an intelligent system for monitoring, controlling and protecting asynchronous electric motors, in particular the drive of the main working element (screw) of the extruder, which operates in difficult operating conditions with significant dynamic load fluctuations throughout the entire technological cycle. The proposed system provides adaptive adjustment of the operating modes of the electric drive in accordance with periodic changes in the technological load, and is also capable of continuously measuring and monitoring controlled electrical parameters (current, voltage, frequency, winding and housing temperature, torque) to assess the technical condition of the electric motor during operation and timely detection of pre-emergency situations that may lead to failure. Implementing this approach increases the reliability of electric motor protection, helps reduce operational losses, increase energy efficiency, and extend their service life.

The developed intelligent system for monitoring, control and protection of asynchronous electric motors, considered on the example of the drive of the main working body of an extruder for the production of feed mixtures and food products, is based on the implementation of innovative solutions and the implementation of information technology concepts, intelligent data analysis and technical diagnostic methods. This system, thanks to the implementation of artificial intelligence algorithms and mathematical models, provides analysis of trends in parameter changes and, in addition to continuous control and monitoring of real controlled parameters, is capable of assessing emergency situations, respond to them in a timely manner and transmit relevant information to the functional blocks of the highest level of management.

The proposed intelligent system combines elements of traditional automation with analytical data processing algorithms and modern methods of technical condition diagnostics, which provides a comprehensive assessment of the reliable operation of electrical machines in the process of performing specified functions.

The implementation of the proposed intelligent system ensures not only the effective operation of the electric drive, but also contributes to the transition of automation of the extrusion technological process to a higher level, which confirms the practical significance and relevance of the research conducted.

Key words: intelligent system, reliability, preventive protection, electric motor, extruder.

Постановка проблеми

На сучасному етапі розвитку новітніх технологій найбільшого розповсюдження у виробництві кормів та харчової продукції набули одношнекові екструдери [1, с. 66].

Одним із ключових елементів такого обладнання є електропривод, який забезпечує обертання робочих органів та визначає стабільність і продуктивність технологічних процесів. Електродвигуни, що працюють у складі ліній виробництва кормів та харчової продукції, постійно зазнають впливу змінного технологічного навантаження, підвищених температур, вібрацій і механічних перевантажень, що робить їх найбільш вразливими до передчасного зношування та аварійних відмов. Традиційні автоматичні системи керування приводами переважно розраховані на роботу установок з фіксованими параметрами та не враховують зміну навантажень на валу електродвигунів в процесі робочого технологічного циклу. Захисні пристрої, традиційних систем, мають обмежену чутливість та не забезпечують комплексного оцінювання параметрів електродвигунів в режимі реального часу. В той час, як у фактичних умовах установки технологічних ліній, в тому числі екструдери, працюють у нерівномірних, близьких до критичних режимах, де характер навантаження змінюється під впливом фізико-механічних властивостей сировини, ступеня її підготовки, швидкості і умов подачі та температурно-вологісних режимів процесу, що призводить до періодичних перевантажень електродвигунів, нераціонального використання електроенергії, прискореного зношування електричних і механічних елементів приводу. Існуючі методи діагностики асинхронних двигунів мають ряд недоліків внаслідок обмеженості використовуваних методів та алгоритмів, застарілості технологій [2, с. 6]. Це, в свою чергу, знижує надійність і довговічність обладнання. Тому для завчасного виявлення змін параметрів, що ведуть до передчасного виходу з ладу [3, с. 95], а також для підтримання оптимальних режимів роботи електроприводів виникає потреба у використанні більш гнучких та інтелектуальних підходів спрямованих оцінювати технічний стан і залишковий ресурс двигунів в процесі їх роботи.

Використання передових технологій [4, с. 34] і високотехнологічних засобів автоматизації надає можливість не тільки активізувати і вдосконалювати існуючі методи діагностування асинхронних двигунів та підвищувати ефективність технологічних процесів, а й створювати новий рівень надійності електроустаткування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В науковій літературі простежується, що значна частина наукових досліджень зосереджені на аналізі та оптимізації конструктивних особливостей екструдерів. Оскільки дослідники прагнуть виявити найбільш ефективні способи вдосконалення конструкцій, що дадуть змогу підвищити продуктивність обладнання [5, с. 115]. Наприклад науковці, зокрема Осипенко В.І., Ситник О.О., Некоз О.І., Філімонова Н.В. та інші вважають, що підвищення якісних технологічних та експлуатаційних показників екструдера можна досягти шляхом вдосконалення конструкції робочої камери, в результаті чого можна скоротити її довжину. Такий підхід надає змогу значно спростити експлуатацію обладнання та забезпечити його максимальну продуктивність [6, с. 115].

Однак, конструктивні зміни не завжди гарантують комплексне підвищення ефективності, оскільки основні втрати енергії та коливання параметрів процесу часто пов'язані з режимами роботи електроприводу, зокрема з нестабільністю навантаження.

Інженер Широкова А.Г. та інші дослідники зазначають, що застосування частотно-регульованих приводів дозволяє суттєво зменшити енергоспоживання, забезпечити високу надійність роботи агрегатів і якість протікання технологічних процесів. Але головний недолік спеціалізованих частотних регульованих електроприводів полягає у тому, що вони не генерують сигнал аварії при аварійному [7, с. 115] режимі. А це не задовольняє сучасні вимоги експлуатації енергообладнання. Тому, незважаючи на існуючі методи підвищення надійності електродвигунів, постає потреба у створенні більш прогресивної систем керування і захисту електроприводів, зокрема, приводу головного робочого органу екструдера лінії виготовлення корму. Такі системи повинні бути здатні не лише стабілізувати технологічні параметри та оперативно реагувати на їх відхилення, а й передбачати виникнення дій збурюючих факторів та здійснювати превентивний захист. Це обумовлено тим, що основною передумовою зниження відмов в період експлуатації, є своєчасне діагностування і прогнозування поточного стану в ракурсі його впливу на період безвідмовної роботи [8, с. 55].

Формулювання мети дослідження

Метою статті є розроблення інтелектуальної системи контролю, керування та захисту електродвигуна, на прикладі приводу головного робочого органу екструдера лінії виготовлення корму, яка забезпечить адаптивне регулювання режимів роботи приводу в умовах нестабільного навантаження та реалізацію функцій самодіагностики, прогнозування технічного стану і своєчасного реагування на аварійні ситуації в режимі реального часу.

Викладення основного матеріалу дослідження

Під час роботи екструдера лінії виготовлення кормів та харчової продукції відбуваються різноманітні фізичні процеси, внаслідок чого навантаження на валу двигуна основного робочого органу постійно знаходиться в динаміці. Реалізація різних типів навантаження призводить до завищення потужності приводних двигунів [9, с. 322] та підвищення ймовірності виникнення перевантажень, перегріву обмоток і механічних зношувань, в кінцевому підсумку, до негативних аварійних наслідків, що носять електричний або механічний характер.

Аварії електричного характеру спричиняють відхилення параметрів мережі живлення, порушення фазової симетрії, струмові пошкодження, що виникають унаслідок обривів статорних чи роторних обмоток, міжвиткових і міжфазних замикань, пробоям ізоляції, спричиненого тепловим перевантаженням, руйнування контактних з'єднань. А також можуть виникнути аварії, пов'язані зі зниженням опору ізоляції внаслідок її старіння, механічного руйнування чи зволоження. Крім того, відомо, що основна частина відмов, через підвищену вібрацію [10].

Не прості експлуатаційні умови, притаманні лініям виготовлення кормів та харчової продукції, формують низку несприятливих чинників, які суттєво ускладнюють роботу асинхронних двигунів, зокрема приводу головного робочого органу екструдера. Внаслідок цього різко зростають вимоги до засобів діагностування та захисту електроприводів. Це зумовлює потребу у застосуванні більш адаптованої системи керування, контролю параметрів та одночасного діагностування в режимі реального часу, що забезпечить безперервний моніторинг технічного стану електродвигуна та автоматичний захист від аварійних режимів без тимчасового припинення роботи. Розв'язання цих проблемних задач дозволить підвищити технічний рівень екструдерів [1, с. 66], оптимізувати процеси керування електроприводами та підтримати експлуатаційні показники в межах установлених технічних норм. Зокрема, стабілізувати роботу електродвигуна в умовах змінного навантаження, скоротити кількість відмов та підвищити надійність і довговічність приводу шнека екструдера. Основними документами, що регламентують умови експлуатації електричних машин, є стандарти, що визначають загальні технічні вимоги до електричних машин [11], і є важливою нормативною основою для забезпечення їх надійності та безпечності. Однак саме інтеграція інтелектуальних засобів керування дає можливість забезпечити цілеспрямоване дотримання цих вимог в умовах реальної, змінної технологічної динаміки.

Враховуючи те, що зовнішні збурюючі чинники такі як підвищення вібрації, зміна тиску, нестабільність струму, часті перевантаження та коливання температур, безпосередньо впливають на електричні двигуни під час їх експлуатації, що істотно знижує стабільність роботи та призводить до передчасного старіння ізоляції і зносу деталей, запропоновано актуальну на сьогоднішній день розробку інтелектуальної системи керування, контролю та захисту. Ця система поєднує елементи класичної автоматики з алгоритмами аналітичної обробки даних та сучасними методами самодіагностики, прогнозування і попередження розвитку різного типу дефектів. Вона здатна проводити аналіз динаміки зміни параметрів, що забезпечує раннє виявлення відхилень, адаптивне регулювання режимів роботи та превентивне запобігання аварійним ситуаціям. Це суттєво підвищує надійність і ефективність роботи електроприводів та їх довговічність. Сучасні прогресивні підходи до вдосконалення системи автоматичного керування технологічним процесом екструдювання кормових сумішей і харчових продуктів дедалі більше орієнтуються на впровадженні інноваційних рішень і реалізації концепцій інформаційних технологій, інтелектуального аналізу даних та методів технічної діагностики. Такі технічні рішення дозволяють уникнути затримок та оптимізувати робочі процеси за рахунок швидкого і точного виконання команд, істотно скоротити

час простою і прискорити виконання завдань [12, с. 54], оскільки застосування методів і засобів діагностування трифазних асинхронних двигунів є ефективним способом забезпечення високої їх надійності, що дозволяє скоротити терміни та трудомісткість технічного обслуговування і ремонту [13, с. 8]. Зокрема, щоб підготуватися до запланованого ремонту, бажано виявити всі дефекти, що впливають на ресурс, задовго до відмови [14, с. 67].

Запропонована розробка інтелектуальної системи керування, контролю та захисту електродвигуна приводу головного робочого органу (шнека) екструдера забезпечує комплексну оцінку технічного стану під час роботи завдяки багатофункціональним вимірюванням контрольованих параметрів, їх аналітичній обробці та застосуванню високотехнологічних методів діагностування. Ненормальні режими приводу екструдера найбільш проявляються таким чином: струмові перевантаження викликають інтенсивний нагрів обмоток статора, пульсації моменту прискорюють зношування підшипників та валу, ударні динамічні навантаження проявляються при різкій зміні параметрів сировини, погіршення тепловідведення виникає в результаті накопичення пилу, бруду та підвищення температури оточуючого середовища.

Архітектура системи складається з основних взаємопов'язаних модульно-функціональних блоків, які виконують чітко визначені функції, а саме (рис. 1):

- Блок збору інформації, який реалізує сенсорні модулі для безперервного вимірювання і реєстрації фазних струмів статора, напруги живлення, крутного моменту, температури обмоток і корпусу, швидкості обертання і навантаження на валу двигуна та вібраційних і акустичних коливань. Зібрана інформація є основою формування оцінки технічного стану та аналізу ознак аварійності.

- Блок первинної обробки інформації виконує оцифрування сигналів, фільтрацію, нормалізацію та усунення перешкод, структурування та коректування даних для подальшої коректної обробки, що підвищує точність діагностичного аналізу.

- Блок інтелектуальної діагностики (аналітичний модуль), який реалізує алгоритми штучного інтелекту та математичних моделей для аналізу і оцінки параметрів, що характеризують технічний стан електродвигуна: амплітудних і спектральних складових струму, коефіцієнтів гармонік, теплових моделей, відхилень напруги, показників вібрації та ковзання. На основі аналізу цих показників формується база для прогнозування розвитку несправностей.

- Блок прогнозування та виявлення відхилень дозволяє по заданих і поточних даних оцінити залишковий ресурс електродвигуна та спрогнозувати наближення аварійних режимів. Тобто цей блок формує відповідні команди залежно від визначеного технічного стану, а саме: рекомендації щодо корекції режимів роботи, обмеження навантаження, зміна швидкості, вимкнення двигуна, активація захисних пристроїв, перехід у безпечний режим та подача оператору сигналу попередження аварійного режиму. Зокрема, блок забезпечує виявлення міжвиткових замикань, перевантажень, зниження опору ізоляції, порушення теплового режиму, механічних дефектів приводу та інших чинників.

- Блок адаптивного керування виконавчими механізмами автоматично корегує режим роботи електродвигуна відповідно поточного коливання навантаження і прогнозованих змін технологічного процесу. Цей блок реалізує сформовані команди від аналітичного блоку через інтерфейси Modbus RTU для регулювання параметрів частотно-регульованого приводу. Це дозволяє автоматично регулювати частоту та напругу живлення електродвигуна, забезпечуючи стабілізацію швидкості обертання незалежно від динаміки навантаження, підтримання оптимального моменту, обмеження струму в аварійних режимах, компенсацію пікових навантажень та корегування режимів пуску та зупинки. Це дозволяє адаптувати роботу приводу відповідно до струму навантаження.

- Блок апаратного захисту працює незалежно від інтелектуальних алгоритмів, що забезпечує багаторівневий захист електродвигуна від перевантажень, перенапруг, асиметрії фаз, перевищення температури, виявлення короткого замикання, механічних блокувань та критичних відхилень параметрів, що підвищує надійність електроприводу. У випадку небезпечного режиму блок формує сигнал на автоматичне аварійне відключення або переведення системи в безпечний режим у разі виникнення критичних відхилень.

- Блок комунікації (архівації) та передачі даних забезпечує накопичення статистичної інформації в локальних або хмарних сховищах, а також обмін інформацією між усіма функціональними блоками та зовнішніми базами даних і контролерами за допомогою стандартних протоколів інтеграції системи.

- Блок інтерфейсу та моніторингу надає оператору доступ до інформації, тобто, забезпечує візуалізацію параметрів (струм, напруга, швидкість, температура, навантаження) в реальному часі, індикацію аварійних відхилень, взаємодію з оператором. Оператор отримує оперативні повідомлення про відхилення, прогнози відмов та рекомендації з технічного обслуговування.

В момент дослідження розглядався електродвигун приводу шнека екструдера типу АІР180М4У3 потужністю 30 кВт, швидкістю обертання 1470 об/хв, моментом інерції $J = 0,19 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$, номінальний струм 56,9 А.

Розроблена інтелектуальна система, яка застосовувалася цим двигуном працює наступним чином: датчики вимірюють контрольовані величини, саме: пусковий струм, який по розрахунковим даним становить $\approx 398\text{А}$, швидкість розгону, температуру обмоток, напругу мережі, вібрацію від стартового навантаження. Зібрана

інформація передається в блок первинної обробки. Там інформація оцифровується і фільтрується від шумових сигналів, очищається, тобто, всі дані стандартизуються. Момент екструдера безпосередньо залежить від щільності та вологості сировини. В момент старту пусковий струм затримувався на високому рівні 1,2-1,4 с замість попередньо розрахованого 0,8с.

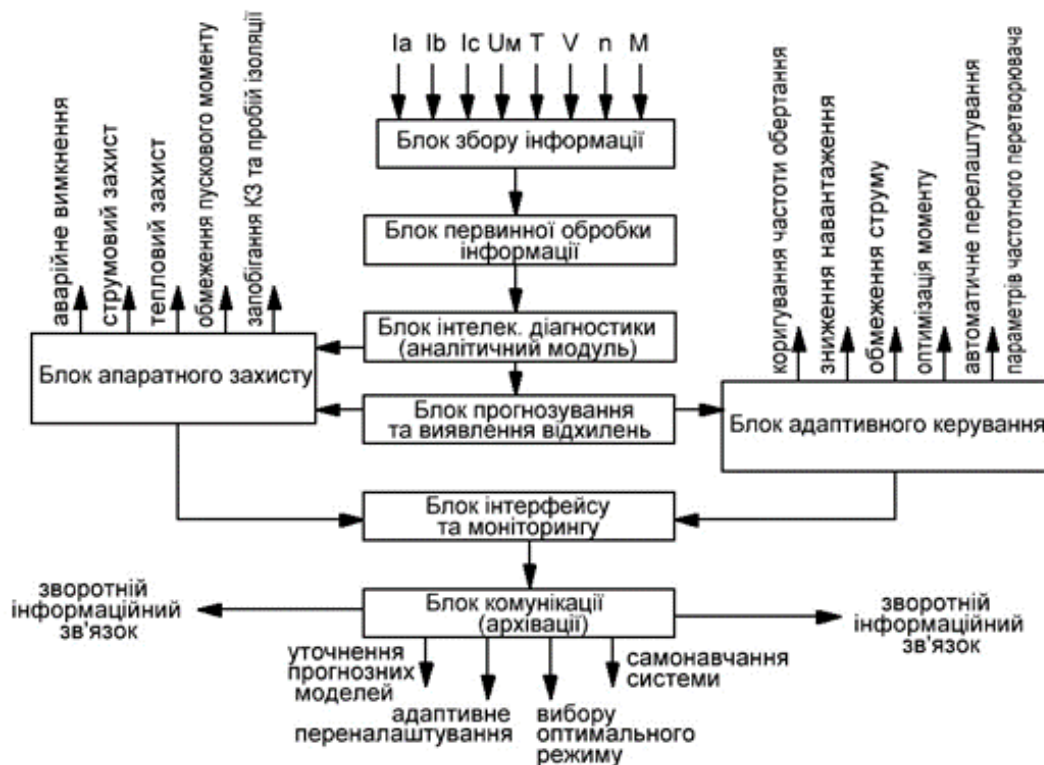


Рис. 1. Структурна схема інтелектуальної системи керування, контролю та захисту електродвигуна приводу головного робочого органу екструдера

Аналітичний модуль використовуючи історичні та поточні дані аналізує стан двигуна, тобто, проводить аналіз трендів пускового струму порівнюючи з еталонними характеристиками двигуна визначивши ступень навантаження шнека.

Момент навантаження становить, якщо $n_n = 1470 \text{ об/хв} = 24,5 \text{ об/с}$:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{30000}{2\pi \cdot 24,5} \approx 195 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

де P_n - номінальна потужність, Вт; ω – номінальне значення кутової швидкості, с^{-1} .

Під час роботи момент перевищив 270 Н·м, хоча номінальний момент становить 195-200 Н·м. Аналітичний модуль проаналізувавши показники виявив, що шнек завантажений надмірно в результаті можливого ущільнення або підвищеної вологості.

Блок прогнозування аналізує наступні поточні дані: запізнення розгону, підвищений момент, зростаючий споживаний струм під час роботи. Цей блок визначає режим роботи шнека, формує керуючі команди і видає сигнал попередження про зростання крутного моменту в результаті ймовірного ущільнення сировини у шнеку і сигнал попередження, що через 5-7 хвилин ймовірно виникнення перевантаження в результаті чого може статися перегрів статора.

Частотний перетворювач коректує і змінює режим роботи двигуна. Подається команда на 10-15% зменшення подачі сировини, для того, щоб стабілізувати тиск в зоні дозування. Зокрема, автоматично змінюється режим роботи, а саме: зменшується частота обертання, знижується сила струму відповідно спадає струм навантаження. У разі виникнення аварійної ситуації передбачається зупинення лінії екструдуювання.

Блок апаратного захисту відслідковує поточні показники. Наприклад, якщо навантаження продовжує зростати, спрацьовує тепловий захист. Ретельно відстежується температура обмоток (наприклад, 120°C поріг). В момент досягнення температури обмоток 125°C система виконує плавне відключення двигуна.

Блок інтерфейсу та моніторингу на екрані висвітлює інформацію в реальному часі: струм змінюється в межах 59-61А, момент навантаження становить 210 Н·м, температура обмоток 98°C, вібрація в нормі, статус системи:

«зниження навантаження успішне». В той же момент автоматично генерується попередження про підвищену густину сировини. Рекомендовано зменшити подачу.

Блок архівації безперервно записує і зберігає дані для подальшої аналітики й оптимізації.

Розроблена інтелектуальна система являється комплексом апаратно-програмованих функціональних блоків (модулів), які взаємодіють в реальному часі з двигуном, перетворювачем частоти, датчиками технологічних параметрів та операторським інтерфейсом для виявлення типових несправностей (таблиця 1). На відміну традиційних методів керування інтелектуальна система дозволяє не лише стабілізувати роботу технологічного обладнання в умовах змінних навантажень, а й суттєво підвищувати експлуатаційні показники приводу екструдера (таблиця 2), що забезпечує збільшення ресурсу двигуна та мінімізацію аварійних ситуацій.

Таблиця 1

Здатність системи виявлення типових несправностей

Тип несправності	Ознака	Методи виявлення
Коротке замикання у витках обмотки	Збільшення струму, нагрів	Аналіз гармонік струму
Дисбаланс фаз	Різниця струмів між фазами	Аналіз фазних струмів
Знос підшипників	Вібрації, шум	Спектральний аналіз вібрацій
Розбаланс ротора	Зміна частоти обертів, вібрації	Аналіз струмів та вібрацій
Перевантаження або перегрів	Температура обмотки	Термоконтроль

Таблиця 2

Порівняльна характеристика експлуатаційних показників приводу екструдера

Параметр	Традиційна система	Інтелектуальна система
Час реакції на перевантаження	1,2–1,7 с	0,12–0,25 с
Виявлення ранніх дефектів	ні	так
Плавність регулювання моменту	низька	висока
Споживання електроенергії	100 %	85–90 %
Кількість аварійних зупинок	висока	знижена на 40–60 %

Розроблена інтелектуальна система найбільш є особливо ефективною, оскільки забезпечує довготривале збереження та обробку великих масивів даних у локальному або хмарному середовищі, що містять інформацію про динаміку зміни технічного стану електродвигуна, зокрема розвиток пошкоджень та параметри їх прогресування. Накопичення та аналіз таких даних дає можливість своєчасно оцінювати ступінь зношення ізоляції і інших критичних елементів двигуна та запобігати аварійним відмовам обладнання. Оскільки система поєднує класичні принципи електромашинобудування з сучасними методами обробки реальних експлуатаційних даних, створюючи основу для енергоефективного, безпечного та технологічно «розумного» виробництва.

Створена систему також може бути ефективно використана в освітньому процесі для поглиблення вивчення теоретичних і практичних аспектів роботи електричних машин. Здобувачі вищої освіти матимуть змогу сформулювати компетентності з дисципліни «Електричні машини», зокрема під час опанування тем «Дослідження фізичних процесів у трифазному асинхронному двигуні» та «Методи вимірювання параметрів і аналіз характеристик асинхронних двигунів». Крім того, система може бути інтегрована у вивчення дисципліни «Основи технічної експлуатації енергообладнання і засобів автоматизації», де сприятиме засвоєнню питань з технічного обслуговування, моніторингу, надійності, профілактики та методів впровадження автоматизованих систем контролю стану електротехнічного обладнання.

Висновки та перспективи подальших розвідок

Запропонована розробка інтелектуальної системи керування, контролю та захисту електродвигуна приводу головного робочого органу екструдера забезпечує набагато вищий рівень надійності та енергоефективності на відміну традиційним методам захисту завдяки реалізації підходів до комплексного контролю і діагностики електричної машини спрямованих на виявлення аномальних режимів, прогнозування ймовірних несправностей, попередження відмов на ранніх стадіях їх зародження та можливостей адаптувати роботу приводу в залежності зміни навантаження. Такі системи можна використовувати не лише в лініях екструдуювання кормової суміші і харчової продукції, а й інших технологічних процесах з нестабільним навантаженням. Упровадження системи дає можливість перевести сучасні технологічні лінії від концепції «роботи за власним режимом» до принципів Smart-систем, що сприяє підвищенню продуктивності установок, зменшенню експлуатаційних витрат, зниженню витрат електроенергії до 10-18%, продовженню ресурсу роботи електродвигунів на 25-40%.

Список використаної літератури

1. Осипенко В.І., Ситник О.О., Некоз О.І., Філімонова Н.В. Обґрунтування шляхів технічного і технологічного вдосконалення екструдерів. *Вісник Хмельницького національного університету*, 2011. № 1. С. 66-73.
2. Купін А. І., Кузнецов Д. І. Інформаційна технологія для групової діагностики асинхронних електродвигунів на основі спектральних характеристик та інтелектуальної класифікації. Монографія. Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д. О., 2016. 200 с.
3. Чорна О.А., Чорний О.П., Курляк П.О., Калінін Д.П., Костанда О.І. Система діагностики асинхронних двигунів на основі клієнт-серверної технології та розподіленої СКБД MySQL Cluster. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 2023. Вип. 2 (139). С. 94-101.
4. Поліщук А.О. Розробка конструкції шнекового екструдера 3D-принтера, що використовує гранули або подрібнені частки полімеру в якості вихідної сировини. *Технології та інжиніринг*, 2023. № 5(16). С. 33-48.
5. Самойчук К.О., Самохвал В.А. Дослідження роботи шнекового прес-екструдера в парі з багатосекційним пристроєм формування паливних брикетів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*, 2025. Вип. 15. Т. 1. С. 114-120.
6. Самойчук К.О., Самохвал В.А. Дослідження роботи шнекового прес-екструдера в парі з багатосекційним пристроєм формування паливних брикетів. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*, 2025. Вип. 15. Т. 1. С. 114-120.
7. Лакосіна А.О., Широкова А.Г. Сучасне застосування частотно-регульованого асинхронного електроприводу. *Сучасний стан та перспективи розвитку електротехнічних систем: матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції пам'яті В.В. Овчарова (Мелітополь, 04 – 18 листопада 2021 р.)*. Мелітополь: ТДАТУ, 2021. С. 81-82.
8. Губаревич О.В., Голубєва С.М. Аналіз методів діагностики технічного стану ізоляції асинхронних двигунів. *Всеукраїнський науковий збірник «Наукові праці Донецького національного технічного університету»*. Серія «Електротехніка і енергетика», 2019. С. 55-63.
9. Куценко Ю.М. Дослідження нагріву приводних електродвигунів вальцевого станка лінії виробництва борошна. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*, 2014. Вип. 27. С. 321-328.
10. Павленко Т.П., Шавкун В.М., Петренко В.М. Шляхи підвищення експлуатаційної надійності електродвигунів рухомого складу електричного транспорту. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Харків, 2015. Вип. 6/10 (78).
11. ДСТУ EN 60204-1:2015 Безпечність машин електрообладнання машин, частина 1. Загальні вимоги (EN60204-1:2006; A1:2009; AC:2010, IDT).
12. Смірнов В.І. Аналіз необхідності автоматизації й автоматичного управління двигуном. «Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві»: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених (20.11.2024, Харків, КІТ-2024). Харків: ХНАДУ, 2024. С. 54-58.
13. Шавкун В.М., Ліньков В.В. Аналіз сучасних методів діагностики технічного стану асинхронних двигунів. *Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. ХНАМГ.: електрична інженерія*, 2019. Вип. 151. Т. 5. С. 2-12.
14. Демішонкова С.А., Демішонков Я.В., Кулік Т.І. Функціональна діагностика параметрів трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*, 2019. № 4 (136). С. 66-76.

References

1. Osypenko V.I., Sytnyk O.O., Nekoz O.I., Filimonova N.V. (2011). *Obgruntuvannia shliakhiv tekhnichnoho i tekhnologichnoho vdoskonalennia ekstruderiv* [Substantiation of ways of technical and technological improvement of extruders]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*. no. 1. pp. 66-73. [in Ukrainian].
2. Kupin A. I., Kuznietsov D. I. (2016). *Informatsiina tekhnolohiia dlia hrupovoi diahnostyky asynkhronnykh elektrodvyhunyiv na osnovi spektralnykh kharakterystyk ta intelektualnoi klasyfikatsii* [Information technology for group diagnostics of asynchronous electric motors based on spectral characteristics and intelligent classification]. Monohrafiia. Kryvyi Rih: Vydavets FOP Cherniavskiyi D.O. 200 p. [in Ukrainian].
3. Chorna O.A., Chornyi O.P., Kurliak P.O., Kalinin D.P., Kostanda O.I. (2023). *Systema diahnostyky asynkhronnykh dvyhunyiv na osnovi kliient-servernoi tekhnolohii ta rozpodilenoї SKBD MySQL Cluster* [Client-server mobile system for diagnosis of asynchronous motors]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*. vol. 2 (139). pp. 94-101. [in Ukrainian].
4. Polishchuk A.O. (2023). *Rozrobka konstrukttsii shnekovoho ekstrudera 3D-pryntera, shcho vykorystovuiie hranuly abo podribneni chastyky polimeru v yakosti vykhidnoi syrovyny* [Development of a 3D printer screw extruder design that

uses granules or crushed polymer particles as the starting material]. Tekhnolohii ta inzhynirynh. no. 5(16). pp. 33-48. [in Ukrainian].

5. Samoichuk K.O., Samokhval V.A. (2025). *Doslidzhennia roboty shnekovoho pres-ekstrudera v pariz bahatosektsiynym prystroiem formuvannia palyvnykh bryketiv* [Studying the operation of a screw press extruder in combination with a multi-sectional fuel briquette forming device]. Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu. vol. 15. T. 1. pp. 114-120. [in Ukrainian].

6. Samoichuk K.O., Samokhval B.A. (2025). *Doslidzhennia roboty shnekovoho pres-ekstrudera v pariz bahatosektsiynym prystroiem formuvannia palyvnykh bryketiv* [Studying the operation of a screw press extruder in combination with a multi-sectional fuel briquette forming device]. Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu. vol. 15. T. 1. pp. 114-120. [in Ukrainian].

7. Lakosina A.O., Shyrokov A.H. (2021). *Suchasne zastosuvannia chastotno-rehulovanoho asynkhronnoho elektropyvodu* [Modern application of frequency-controlled asynchronous electric drive]. Suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku elektrotekhnichnykh system: materialy IV Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii pamiati V.V. Ovcharova (Melitopol, 04 – 18 lystopada 2021 r.). Melitopol: TDATU. pp. 81-82. [in Ukrainian].

8. Gubarevych O.B., Golubieva S.M. (2019). *Analysis of methods for diagnosing the technical condition of asynchronous motor insulation* [Analysis of methods for diagnosing the technical state of insulation of induction motors]. All-Ukrainian scientific collection "Scientific works of Donetsk National Technical University". Series "Electrical Engineering and Power Engineering. pp. 55-63. [in Ukrainian].

9. Kutsenko Yu.M. (2014). *Research on the heating of drive electric motors of the roller mill of the flour production line* [Research of electric drive motors heating of valtsovoho stanka production of flour line rolling machine of the flour production line]. Equipment in agricultural production, industrial mechanical engineering, automation. vol. 27. pp. 321-328. [in Ukrainian].

10. Pavlenko T.P., Shavkun V.M., Petrenko V.M. (2015). *Shliakhy pidvyshchennia ekspluatatsiinoi nadiinosti elektrodvyhuniv rukhomoho skladu elektrychnoho transportu* [Shliakhy pidvyshchennia ekspluatatsiinoi nadiinosti elektrodvyhuniv rukhomoho skladu elektrychnoho transportu]. Skhidno-Yevropeiskyi zhurnalпередовykh tekhnolohii. Kharkiv. vol. 6/10 (78). [in Ukrainian].

11. DSTU EN 60204-1:2015 "Safety of machinery electrical machinery machines, part 1. General requirements" (EN60204-1:2006; A1:2009; AS:2010, IDT).

12. Smirnov V.I. (2024). *Analiz neobkhidnosti avtomatyzatsii y avtomatychnoho upravlinnia dvyhunom* [Analysis of the need for automation and automatic engine control]. «Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii avtomatyzatsii tekhnolohichnykh protsesiv na transporti ta u vyrobnytstvi»: materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh (20.11.2024, Kharkiv, KIT-2024). Kharkiv, KhNADU. pp. 54-58. [in Ukrainian].

13. Shavkun V.M., Linkov V. V. (2019). *Analiz suchasnykh metodiv diahnostryky tekhnichnoho stanu asynkhronnykh dvyhuniv* [Studying the operation of a screw press extruder in combination with a multi-sectional fuel briquette forming device]. Komunalne hospodarstvo mist: nauk.-tekhn. zb. KhNAMH.: elektrychna inzheneriia. vol. 151. T. 5. pp. 2-12. [in Ukrainian].

14. Demishonkova S.A., Demishonkov Ya.V., Kulik T.I. (2019). *Funktsionalna diahnostryka parametriv tryfaznogo asynkhronnoho dvyhuna z korotkozamknеныm rotorom* [Functional diagnosis of the parameters of the three-phase asynchronous engine with a short-circuited rotor]. Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. no. 4 (136). pp. 66-76. [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 18.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 16.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

Ю. М. ГОЛОБОРОДЬКО

кандидат технічних наук,

доцент кафедри безпеки інформаційних технологій

Харківський національний університет радіоелектроніки

ORCID: 0009-0007-4040-9467

РАДІОМОНІТОРИНГ ДЕКАМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ

Актуальність та проблема. Успішність військових операцій критично залежить від ефективності радіоелектронної розвідки (РРТР), особливо у декаметровому (3–30 МГц) діапазоні, який використовується для зв'язку на великі відстані. Ключовою проблемою тактичної РР є критичне завантаження спектра та домінування РВ дальньої зони (відбиття від іоносфери) над цільовими РВ ближньої зони на кілька порядків. Існуючі методи радіоконтролю, що використовують ручний або візуально-апаратний аналіз параметрів сигналу (федінг, стійкість пеленгу), мають надто низьку швидкодію, що робить неможливим виявлення короткочасних цільових випромінювань.

Мета роботи. Розробка та обґрунтування автоматизованих підходів для селекції цільових РВ та підвищення швидкодії систем РРТР у декаметровому діапазоні, зокрема при використанні малогабаритних приймальних антен. Досягнення цієї мети передбачає ефективне використання апріорної інформації.

Методи дослідження. Запропонована методологія ґрунтується на послідовному огляді діапазону з проріджуванням (скороченням) потоку РВ, які надходять на розпізнавання. Проріджування здійснюється за двома основними апріорними ознаками: 1) частотні канали, де цільові РВ відсутні; 2) зони розміщення джерела (автоматична дискримінація РВ дальньої зони). Задача виявлення та розпізнавання цільових РВ у частотному каналі зводиться до багатоальтернативного виявлення випадкових сигналів в умовах підвищеної апріорної невизначеності (зокрема, невідомих статистичних характеристик перешкод).

Основні результати та практичне значення. Аналіз показує, що застосування проріджування за ознакою зони розміщення джерела (ближня/дальня) дозволяє у кілька десятків разів зменшити потік РВ, що надходять на детальний аналіз. Це забезпечує значне скорочення часу огляду всього діапазону та підвищує ймовірність виявлення короткочасних випромінювань, що є критичним для тактичної РР. Запропонований підхід дозволяє вирішити задачу побудови комплексу радіоконтролю з дотриманням суперечливих обмежень на швидкодію та апаратні витрати. Існує необхідність подальших досліджень для підвищення ймовірності правильного виявлення нових РВ, яка наразі становить лише $\$P_D \approx 0.3-0.4\$$ при використанні енергетичного принципу.

Ключові слова: радіомоніторинг, декаметровий діапазон, тактична РРТР, проріджування потоку, апріорна інформація, багатоальтернативне виявлення, ближня зона, дальня зона, швидкодія.

YU. M. HOLOBORODKO

Ph.D., Associate Professor at the Department of Information Technology Security

Kharkiv National University of Radio Electronics

ORCID: 0009-0007-4040-9467

DECAMETER BAND RADIO MONITORING

Relevance and Problem Statement. The success of military operations critically depends on the effectiveness of Radio-Electronic Reconnaissance (RRTR), particularly within the Decameter (3–30 MHz) band used for long-distance communication. The core challenge for tactical RR is critical spectrum congestion and the dominance of far-zone RE (due to ionospheric reflection) over near-zone target RE by several orders of magnitude. Existing radio monitoring methods, which rely on manual or visual-instrumental analysis of signal parameters (fading, bearing stability), exhibit excessively low speed, rendering the detection of short-duration target emissions nearly impossible.

Objective. To develop and substantiate automated approaches for the selection of target RE and increasing the speed of RRTR systems in the decameter band, especially when using small-sized receiving antennas. Achieving this objective necessitates the efficient use of a priori information.

Research Methods. The proposed methodology is based on sequential band scanning with flow thinning (reduction) of the RE flux submitted for recognition. Thinning is performed using two primary a priori features: 1) frequency channels where target RE are confirmed absent; 2) the source location zone (automated discrimination of far-zone RE). The task of detecting and recognizing target RE in a frequency channel is reduced to multi-alternative detection of random signals under conditions of increased a priori uncertainty (specifically, unknown statistical characteristics of interference).

Main Results and Practical Significance. Analysis demonstrates that applying thinning based on the source location zone (near/far) enables a several dozen-fold reduction in the RE flow submitted for detailed analysis. This significantly shortens the scanning time across the entire band and increases the probability of detecting short-duration emissions, which is critical for tactical RR. The proposed approach allows for the development of a radio monitoring complex that satisfies the conflicting constraints on operational speed and hardware costs. Further research is needed to increase the probability of correct detection of new RE, which currently stands at only $\$P\_D \approx 0.3-0.4\$$ when using the energy principle.

Key words: radio monitoring, decameter band, tactical RRTR, flow thinning, a priori information, multi-alternative detection, near zone, far zone, speed of operation.

Постановка проблеми

Надійний зв'язок є критично важливим для успіху військових операцій та функціонування силових структур, забезпечуючи синхронізацію дій, оперативне виявлення загроз та стратегічну координацію. З розвитком сучасних технологій та широким впровадженням цифрових систем, залежність озброєння та бойової техніки від сенсорів та обміну інформацією постійно зростає, що підкреслює вирішальну роль радіоелектронної боротьби (РЕБ). У цьому контексті, ефективність армії майбутнього значною мірою визначається її здатністю гнучко адаптувати доктрини, структури та методи підготовки до розвитку РЕБ [1, 2].

Особливе значення в РЕБ має радіомоніторинг (радіо- та радіотехнічна розвідки – РРТР), який відповідає за виявлення, пеленгування та аналіз джерел електромагнітного випромінювання противника [3]. Якщо стратегічна РРТР зосереджена на підготовці до операцій, то тактична РРТР ведеться безперервно під час бойових дій, надаючи критично важливу інформацію для управління військами та озброєнням, у тому числі РЕБ.

Декаметровий (короткохвильовий, КХ/ВЧ, 3,0–30,0 МГц) радіозв'язок широко використовується у військових операціях оскільки забезпечує зв'язок на значні відстані завдяки відбиттю від іоносфери [6]. В ефірі в районі ведення військової операції спостерігаються РВ декаметрового діапазону як ближньої зони (поширення прямим променем), так і дальньої зони (відбиття від іоносфери). Кількість РВ дальньої зони на кілька порядків перевищує кількість РВ ближньої зони.

Проблема тактичної РР декаметрового діапазону для потреб РЕБ полягає у необхідності крім автоматизованої ідентифікації об'єктів зв'язку та автоматизованого визначення зони (ближньої чи дальньої) походження випромінювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для тактичної РРТР однією з важливих головних параметрів є швидкодія, тобто процеси виявлення, розпізнавання об'єктів тощо, повинні бути максимально автоматизовані. Є багато публікацій, присвячених автоматизації РРТР, які належать до процесів виявлення, розпізнавання об'єктів [3, 4, 5], проте питання визначення зони розміщення джерела випромінювання розглядаються дуже мало [7], особливо малогабаритних засобів РРТР.

Формулювання мети дослідження

У статті розглядаються шляхи подальшої автоматизації процесів РРТР у декаметровому діапазоні, у тому числі визначення зони розміщення джерела випромінювання, при використанні малогабаритних приймальних антен.

Викладення основного матеріалу дослідження

Аналіз сучасного стану та проблеми РРТР декаметрового діапазону

Радіорозвідка – це система технічних засобів та заходів, спрямованих на виявлення, перехоплення, аналіз та оцінку РВ, з метою контролю за використанням радіочастотного спектру, а також виявлення загроз, пов'язаних з використанням радіоелектронних засобів. РР також може включати дії щодо порушення роботи радіоелектронних засобів шляхом РЕБ.

Завдання оперативного радіоконтролю завантаження декаметрового діапазону вимагає не лише виявлення РВ, а й точного визначення зони їхнього розміщення та розпізнавання заданих сигналів серед великої кількості невідомих, що не становлять оперативного інтересу. Існуючі методи радіоконтролю, які часто базуються на ручному пошуку та візуально-апаратному аналізі, мають низьку швидкодію. Час, що витрачається оператором на аналіз одного випромінювання (від секунд до хвилин), робить виявлення короточасних РВ майже неможливим і змушує різко зменшувати ширину діапазону, що обслуговується системою РР. Крім того, ці методи вимагають аналізу всіх виявлених сигналів, що істотно знижує швидкодію системи.

У відповідь на ці виклики, актуальною стає розробка автоматизованих систем радіоконтролю, здатних ефективно виділяти (селектувати) РВ за зоною розміщення джерела та видом випромінювання. Метою цієї статті є аналіз існуючих проблем і задач радіоконтролю декаметрового діапазону та обґрунтування застосування підходів, заснованих на використанні апріорної інформації про РВ, для автоматизації процесів їх виявлення та розпізнавання.

Концепція проріджування потоку РВ: Застосування апріорної інформації

Наразі це завдання зазвичай вирішується наступним чином: за допомогою панорамного радіоприймального пристрою (РПУ) здійснюється пошук радіовипромінювань у заданому діапазоні частот. Потім усі виявлені випромінювання піддаються слуховим або візуально-апаратним способам аналізу для виявлення заданих РВ [8].

У зв'язку з тим, що за існуючих методів виявлення оператору пред'являються для аналізу всі виявлені РВ (як цільові, так і численні невідомі), швидкодія таких систем РР не задовольняє сучасним вимогам. Зокрема, час, який витрачається оператором на аналіз одного випромінювання, становить від одиниць секунд до одиниць хвилин. За такої методології РР ймовірність виявлення короточасних РВ прямує до нуля і для реалізації можливості виявляти короточасні випромінювання доводиться різко знижувати ширину діапазону частот, що обслуговується одним оператором.

Завантаження декаметрового радіодіапазону залежить від багатьох факторів і дуже впливає на надійність радіозв'язку [6]. Для підвищення надійності радіозв'язку необхідно здійснювати оперативний радіоконтроль завантаження декаметрового діапазону радіочастот. З цією метою слід із множини РВ, які існують в ефірі, виділити цільові (задані).

У декаметровому діапазоні хвиль існує множина РВ, що відрізняються:

- частотою;
- розміщенням джерела в просторі (у ближній зоні – зоні поверхневого поширення електромагнітної хвилі, і в дальній – зоні просторового поширення електромагнітної хвилі);
- видом радіовипромінювання (вид модуляції та маніпуляції, параметри модулюючого сигналу, тощо);
- рівнем сигналу;
- часом появи;
- тривалістю.

У ряді випадків радіоконтролю діапазону частот оперативний інтерес представляють РВ, для яких апіорі відомі:

- вид радіовипромінювання;
- зона розміщення джерела радіовипромінювання (ближня);
- ділянки діапазону або номінали частот, на яких задані РВ не можуть з'явитися.

Алгоритм автоматизованої селекції РВ за зоною розміщення джерела

Для визначення зони розміщення джерела радіовипромінювання використовують або антенні системи з великою апертурою для вимірювання вертикальних кутів приходу електромагнітної хвилі (кутів місця), або непрямі методи, що ґрунтуються на тривалому спостереженні за РВ (оцінка федингу, стійкості пеленгу, тощо).

В даний час для визначення зони розміщення джерела випромінювань використовують тривале спостереження за змінами параметрів сигналу, такими як рівень, фаза в різних елементах антени, пеленг. Оператор витрачає від одиниць секунд до хвилин на кожне випромінювання. Необхідно автоматизувати цей процес. Необхідно збирати статистичні дані паралельно для всіх РВ у смузі контролю та за результатами їх обробки класифікувати випромінювання як ближньої або дальньої зони [7].

Постановка задачі багатоальтернативного виявлення цільових сигналів

Аналіз поставленої задачі РР показує, що компромісне рішення може бути отримано при послідовному огляді заданого діапазону з проріджуванням всієї сукупності аналізованих каналів з урахуванням наявної апіорної інформації про задані РВ. Зокрема, ряд частотних каналів не потрібно аналізувати, оскільки в них задані РВ не можуть з'явитися. Крім того, можна виключити з аналізу частотні канали з РВ дальньої зони. Це дозволяє зменшити час послідовного огляду до величини, що визначається заданими обмеженнями на час вирішення завдання виявлення та розпізнавання, що визначаються часом існування РВ.

Необхідно оптимізувати систему за сукупністю показників якості з урахуванням сформульованих умов та обмежень. Особливості вирішуваного завдання такі: передбачається, що відбувається послідовний огляд декаметрового діапазону частот за допомогою автоматизованого панорамного комплексу (РПК) [6-8]. При аналізі частотного каналу за сигналами з виходу панорамного приймача має прийматися рішення про наявність чи відсутність одного із заданих РВ. Причому сигнали мають випадковий характер через випадковий в загальному випадку характер повідомлень, що передаються, а також дію перешкод у частотному каналі. Тому завдання прийняття рішення у частотному каналі зводиться до багатоальтернативного виявлення заданих випадкових сигналів за наявності невідомих сигналів [9]. Для проріджування числа аналізованих каналів має бути використана апіорна інформація про характерні особливості заданих РВ.

За умовами завдання багатоальтернативне виявлення заданих РВ повинно проводитись в умовах підвищеної апіорної невизначеності. Зокрема, статистичні характеристики сигналів із виходу РПК апіорі невідомі. Однак можуть бути отримані навчальні вибірки сигналів для заданих РВ. Для інших (невдомих, таких, що заважають) РВ навчальні вибірки неможливо отримати, або вони не є представницькими, тобто вони є недостатніми для синтезу алгоритмів обробки.

При оптимізації структури алгоритмів виявлення має бути враховано сукупність показників якості виявлення та реалізованих витрат з урахуванням використання бортових засобів обчислювальної техніки. Реалізованість засобами обчислювальної техніки забезпечить гнучкість структури отриманих виявників. Для скорочення (проріджування) числа каналів, у яких має проводитися багатоальтернативне виявлення заданих РВ, необхідно

використовувати різні характерні ознаки РВ, що ґрунтуються на обліку апіорних даних про задані РВ (ближня – дальня зона, номінал частоти тощо).

У ряді випадків вирішення поставленої задачі виявлення заданих РВ у частотному каналі виникають ситуації, коли задані РВ свідомо відсутні, і необхідно вирішувати завдання лише виявлення нових (нових, що з'являються на тлі існуючих) РВ з невідомими характеристиками. У низці робіт показано, що рішення задачі виявлення нових (невдомих) сигналів, за умови відсутності цільових сигналів, впливає як окремий випадок із рішення задачі багатоальтернативного виявлення цільових сигналів за наявності неведомих. На даний час для вирішення задачі виявлення нових РВ використовується енергетичний принцип виявлення. При цьому забезпечується дуже низька ймовірність правильного виявлення нових РВ (близько 0,3 – 0,4), що не задовольняє реальним вимогам.

Зі змістовної точки зору, завдання розпізнавання заданих РВ може бути сформульована так: у деяких частотних каналах у невідомий час з'являються задані РВ. Зазвичай у цих каналах діє велике число РВ, зокрема й дуже близьких до заданих, але які не мають оперативного інтересу. Потрібно, аналізуючи конкретний частотний канал, виявити та розпізнати задані РВ. При цьому необхідна автоматизація процесу виявлення та розпізнавання заданих сигналів при підвищенні порівняно з відомими як швидкодії системи, так і якості розпізнавання.

Подібна задача може розглядатися як завдання розпізнавання сигналів в умовах підвищеної апіорної невизначеності, коли розпізнаються M заданих сигналів, а інші сигнали, про які немає достатніх даних для їх відмінності або вони не представляють оперативного інтересу, належать до об'єданого $M + 1$ – й класу. Це завдання є окремим випадком завдання багатоальтернативного виявлення заданих сигналів [9].

Як показано, розв'язання задачі побудови комплексу радіоконтролю з урахуванням суперечливих обмежень на час вирішення задачі та на апаратні витрати можлива при послідовному огляді декаметрового діапазону частот з проріджуванням потоку аналізованих РВ. При цьому для скорочення часу огляду всього діапазону на аналіз з метою розпізнавання заданих видів РВ надходять не всі виявлені РВ, а тільки ті, що пройшли проріджування за деякими апіорно відомим ознаками РВ, зокрема, таким, як несуча частота, зона розміщення джерела тощо.

Як відомо, внаслідок маневреності та економічності радіоліній у декаметровому діапазоні частот, парк діючих у цьому діапазоні радіостанцій зростає з кожним роком, а частотний радіоспектр залишається незмінно обмеженим. Наприклад, як показано в [8], відсоток однокілогерцевих смуг із середнім рівнем перешкод (під перешкодами маються на увазі всі радіосигнали, що існують у точці прийому) ≥ 30 дБ для ділянки від 4 до 6 МГц в літньо-осінній період для нічного часу становить 90 %, для ділянки від 12 до 13 МГц – 40%, а для ділянки від 14 до 15 МГц – 10%. Якщо в якості аналізованих смуг прийняти не однокілогерцеві, а двокілогерцевих, відсоток двокілогерцевих смуг із середнім рівнем перешкод ≥ 40 дБ буде близько 50% для всього декаметрового діапазону, тобто для ділянки сумарною шириною 4 МГц (2000 смуг) близько 1000 смуг будуть з перешкод. Апіорно можуть бути відомі до 100 двокілогерцевих смуг, що не становлять оперативного інтересу для вирішення поставленого завдання.

Висновки

Досліджено в реальних умовах способи проріджування потоку РВ, що надходять на розпізнавання при послідовному огляді декаметрового діапазону частот. Проріджування засноване на ознаках частоти та зони розміщення джерела РВ. Запропоновані способи проріджування дозволяють у кілька десятків разів зменшити потік РВ, що надходять на розпізнавання, і тим самим скоротити час огляду широкого діапазону частот. Методи проріджування, засновані на ознаках зони (ближня зона – зона поверхневого розповсюдження електромагнітної хвилі, дальня – зона просторового розповсюдження електромагнітної хвилі) розміщення джерела РВ, розглянуті у [7]. Як правило, у точці прийому радіовипромінювань декаметрового діапазону частот, співвідношення кількості випромінювань дальньої зони до випромінювань ближньої зони становить кілька десятків, і навіть сотень. Якщо оператора цікавлять випромінювання лише ближньої зони, час огляду при автоматичній селекції (дискримінації) випромінювань дальньої зони зменшується майже в стільки ж разів [7].

Список використаної літератури

1. Головне управління радіоелектронної та кіберборотьби. Офіційний веб-сайт МО. URL <https://www.mil.gov.ua/ministry/struktura-generalnogo-shtabu/golovne-upravlinnya-radioelektronnoi-ta-kiberborotbi.html>
2. Рибачок, Д., Скиба, О., Брякін, С., & Доманов, І. Напрямки розвитку засобів радіозв'язку російською федерацією та фактичний стан їхнього застосування у війні проти України. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, 2024, 4(22), стр. 115-120. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.22.2024.14>
3. Майборода І.М., Власов К.В., Глушенко М.О., Застосування і перспективи розвитку мобільних засобів радіоелектронної розвідки тактичної ланки сил сектору безпеки та оборони України, ISSN 2078-7480. *Честь і закон* № 2 (89)/2024, стр. 83 – 90,
4. Довідник військового зв'язківця. Засоби радіоелектронної боротьби та розвідки, які використовуються російською федерацією. Київ, «ЦУЛ», 2024. 64 с.

5. Інформаційна система підтримки прийняття рішень автоматизованої системи управління радіомоніторингом. : Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка, [S. l.], n. 67, p. 5–17, 2020. <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2020/67-01>

6. Короткохвильовий радіозв'язок настанова. Київ. «ЦУЛ», 2024. 83 с

7. Голобородько Юрій, Караваєв Володимир. Селекція джерел радіовипромінювань декаметрового діапазону при використанні малогабаритних приймальних антен, Перший міжнародний науково-практичний форум «Global Cyber Security Forum» 14 – 16 листопада 2019 р., 36. матеріалів форуму, Харків. ХНУРЕ. 2019. 115 с. стр. 41 – 42.

8. Голобородько Ю. М. Радіоконтроль діапазону Short Waves, Research in Science, Technology and Economics: Collection of Scientific Papers, "International Scientific Unity" with Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference. March 5-7, 2025. Luxembourg, Luxembourg. 397 p., стр. 275 – 278. ISBN 979-8-89704-985-1 (series), DOI <https://doi.org/10.70286/ISU-05.03.2025>

9. Omelchenko V. A. Balabanov V. V. Bezruk V. M. Goloborod'ko Ju. N., Detection of Changes in the Random Signal Properties by Spectral Methods Under the Conditions of A Priori Uncertainty, Telecommunications and Radio Engineering. 1999, 53 (9 -10), p. 1-10.

References

1. Holovne upravlinnia radioelektronnoi ta kiberborotby. Ofitsiyniy veb-sait MO [Main Directorate of Radio Electronic and Cyber Warfare. Official website of the Ministry of Defense] URL <https://www.mil.gov.ua/ministry/struktura-generalnogo-shtabu/golovne-upravlinnya-radioelektronnoi-ta-kiberborotbi.html> [in Ukrainian]

2. Rybachok, D., Skiba, O., Bryankin, S., & Domanov, I. (2024) Napryamy rozvytku radiozv'yazku rosiys'koyu federatsiyeyu ta faktychnyy stan yikh zastosuvannya u viyni proty Ukrainy. [Directions of development of radio communication means by the Russian Federation and the actual state of their application in the war against Ukraine] : Zbirnyk naukovykh prats' Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan' ta sertyfikatsiyi ozbroynennya ta viys'kovoyi tekhniki, 4(22), p. 115-120. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.22.2024.14> [in Ukrainian]

3. Mayboroda I.M., Vlasov K.V., Hlushchenko M.A. (2024) Zastosuvannya ta perspektyvy rozvytku mobil'nykh zasobiv radioelektronnoyi rozvidky taktychnoyi lanky syl sektoru bezpeky ta oborony Ukrainy [Application and prospects for the development of mobile electronic reconnaissance means of the tactical link of the forces of the security and defense sector of Ukraine]. ISSN 2078-7480. Chest' ta zakon. No 2 (89), p. 83 – 90 [in Ukrainian]

4. (2024) Dovidnyk viiskovoho zv'iazkivtsia. Zasoby radioelektronnoi borotby ta rozvidky, yaki vykorystovuiutsia rosiiskoiu federatsiieiu [Military Signaller's Handbook. Electronic Warfare and Intelligence Means Used by the Russian Federation]. Kyiv, «TsUL». [in Ukrainian]

5. (2020) Informatsiyna systema dlya pidtrymky pryynyattya rishen' avtomatyzovanoi systemy radiomonitorynhu ta upravlinnya, [Information system for decision support of automated radio monitoring and control system]. Zbirnyk naukovykh prats' Viys'kovoho instytutu Kyivs'koho natsional'noho universytetu imeni Tarasa Shevchenka, [S. l.], n. 67, p. 5–17, <https://doi.org/10.17721/2519-481X/2020/67-01> [in Ukrainian]

6. (2024) Korotkikhvyl'oviy radiozviazok: nastanova [Shortwave radio communication: a guide]. Kyiv. "TsUL". [in Ukrainian]

7. Holoborodko Yuriy, Karavayev Volodymyr (2019) Seleksiya dzherel radiovyprominyuvan' dekametrovoho diapazonu pry vykorystanni malohabarytnykh pryymal'nykh anten, [Selection of sources of radio emissions of the decimeter range when using small-sized receiving antennas]. First International Scientific and Practical Forum "Global Cyber Security Forum" November 14 – 16, 2019, Collection of forum materials. Kharkiv: KhNURE. 115 p. pp. 41 – 42 [in Ukrainian]

8. Holoborodko Y.M. (2025) Radiokontrol' diapazonu Short Waves, [Short Wave Radio Monitoring], Research in Science, Technology and Economics: Collection of Scientific Papers, "International Scientific Unity" with Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference. March 5-7, 2025. Luxembourg, Luxembourg. 397 p., p. 275 – 278. ISBN 979-8-89704-985-1 (series), DOI <https://doi.org/10.70286/ISU-05.03.2025>

9. Omelchenko V. A. Balabanov V. V. Bezruk V. M. Goloborod'ko Ju. N. (1999) Detection of Changes in the Random Signal Properties by Spectral Methods Under the Conditions of A Priori Uncertainty, Telecommunications and Radio Engineering. 53 (9 -10), p. 1-10.

*Дата першого надходження рукопису до видання: 30.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 14.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025*

Я. С. ГРИГОРЕНКО

аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0009-5092-1012

М. Ф. КУЗМІЧОВ

аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0003-1501-6865

Д. О. ДМИТРИЄВ

професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-8200-351X

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЯКОСТІ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ В ПРОЦЕСАХ ПОШАРОВОГО УТВОРЕННЯ

У роботі досліджено інтелектуальні технології визначення характеристик якості металевих виробів, виготовлених методами шарового утворення. Виконано аналіз сучасних публікацій узагальнено основні типи дефектів у процесах лазерного плавлення металевих порошків, їх зв'язок із морфологією порошкової сировини, режимами плавлення та особливостями формування мікроструктури. Показано, що поєднання методів комп'ютерного зору та машинного навчання дає змогу автоматизувати оцінювання якості порошків, in-situ моніторинг melt-pool, виявлення аномальних режимів та прогнозування пористості по шарах. Особливу увагу приділено цифровим двійникам адитивних процесів, які відтворюють теплові, механічні та мікроструктурні поля й забезпечують багатоваріантну оптимізацію параметрів друку до проведення експериментів. Обґрунтовано доцільність інтеграції даних цифрового моделювання, сигналів процесного моніторингу та результатів мікроструктурного аналізу в єдину інтелектуальну систему контролю якості, орієнтовану на відповідальні машинобудівні деталі. Запропоновано структурну схему такої системи, у якій виділено модулі аналізу сировини, планування процесу, in-situ моніторингу, прогнозування дефектів, адаптивного керування та постпроцесної валідації. Показано, що впровадження подібних систем створює підґрунтя для самонавчальних адитивних виробничих комплексів, зменшує рівень пористості та підвищує відтворюваність механічних властивостей виробів. Наукова новизна роботи полягає в систематизації підходів до поєднання цифрових двійників із моделями глибокого навчання та формуванні узагальненої архітектури інтелектуальної системи оцінювання якості в металевому адитивному виробництві. Практичне значення отриманих результатів пов'язане з можливістю зниження обсягу натурних випробувань, скорочення тривалості виведення нових виробів на ринок і підвищення надійності відповідальних елементів конструкцій.

Ключові слова: адитивне виробництво металів, машинне навчання, melt-pool, цифровий двійник, пористість, контроль якості.

YA. S. HRYHORENKO

Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics
and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0009-5092-1012

M. F. KUZMICHOV

Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics
and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0003-1501-6865

D. O. DMYTRIIEV

Professor at the Department of Automation, Robotics
and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-8200-351X

INTELLIGENT TECHNOLOGIES FOR DETERMINING QUALITY CHARACTERISTICS OF METAL PRODUCTS IN LAYER-BY-LAYER FORMATION PROCESSES

The study examines intelligent technologies for assessing the quality of metal parts produced by layer-wise additive manufacturing. Based on an analysis of recent publications, the main defect types in laser powder bed fusion processes are summarized together with their links to powder morphology, melting regimes and microstructural evolution. It is shown that the combination of computer-vision and machine-learning methods enables automated powder characterization, in-situ melt-pool monitoring, detection of anomalous regimes and layer-wise porosity prediction. Particular attention is given to digital twins of additive processes, which reproduce thermal, mechanical and microstructural fields and support multi-scenario optimization of printing parameters before physical experiments are carried out. The feasibility of integrating physics-based simulation data, process-monitoring signals and microstructural characterization results into a unified intelligent quality-control system focused on safety-critical machine-building components is substantiated. A structural scheme of such a system is proposed, comprising modules for raw-material analysis, process planning, in-situ monitoring, defect prediction, adaptive control and post-process validation. It is demonstrated that the implementation of such systems provides a basis for self-learning additive manufacturing lines, reduces porosity levels and improves the repeatability of mechanical properties of parts. The scientific contribution of the work lies in consolidating current approaches to coupling digital twins with deep-learning models and in formulating a generalized architecture of an intelligent quality-assessment framework for metal additive manufacturing. The practical relevance is associated with the potential to reduce the scope of destructive testing, shorten the time-to-market for new products and increase the reliability of critical structural elements operating under demanding service conditions.

Key words: metal additive manufacturing, machine learning, melt pool, digital twin, porosity, quality control.

Постановка проблеми

Адитивне виготовлення металевих виробів перетворилося на одну з базових технологій сучасного високоточного машинобудування. Локалізоване введення енергії в шар порошкового матеріалу та пошарове нарощування геометрії деталі дають змогу створювати складні внутрішні канали, решітчасті структури та топологічно оптимізовані форми, що важко або неможливо реалізувати традиційними методами. Разом із тим, металеві процеси на основі лазерного або електронного променя характеризуються значною кількістю змінних параметрів і складною фізикою тепломасообміну.

За даними оглядових робіт, присвячених оцінюванню адитивного виробництва [1, 2], найпоширенішими дефектами є газова та ключова пористість, зони неповного плавлення, мікротріщини, локальні перегріви й сильна анізотропія структури. Їхня природа зумовлена не лише вибраним матеріалом, а й морфологією порошку, якістю укладання шару, стабільністю розплавленої ванни, стратегією сканування й режимами охолодження. Традиційні методи контролю – макро- і мікроструктурний аналіз вибіркового зразків, неруйнівні випробування лише наприкінці технологічного ланцюга – не дозволяють своєчасно виявляти ділянки підвищеного ризику та прогнозувати властивості деталей до завершення їх виготовлення.

Розвиток сенсорних систем, комп'ютерного зору та методів машинного навчання привів до появи концепції інтелектуального контролю якості, коли рішення приймаються на основі масивів даних, що надходять із різних рівнів процесу [3, 4]. Паралельно розвивається напрям цифрових двійників, у межах якого для кожного виробу формується модель, здатна відтворювати теплові та механічні процеси в зоні побудови [7, 8]. Поєднання цих підходів дає змогу перейти від постфактум-оцінювання до прогнозного керування якістю, однак на практиці відсутня цілісна система, яка б інтегрувала аналіз порошку, цифрове моделювання, in-situ моніторинг та постпроцесну валідацію в єдиний інтелектуальний контур. Саме необхідність розроблення такої інтегрованої системи визначення характеристик якості металевих виробів у процесах пошарового утворення і становить основну наукову проблему даної роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Адитивне виготовлення металевих виробів сьогодні розглядають як одну з ключових технологій високоточного машинобудування. Роботи [1, 2] показують, що завдяки локалізованому введенню енергії в шар порошкового матеріалу та пошаровому нарощуванню геометрії стає можливим створення топологічно оптимізованих деталей зі складними внутрішніми каналами й решітчастими структурами. Узагальнений вигляд сучасних адитивних технологій та компонування обладнання для LPBF/SLM наведено на рис. 1, де показано типову конфігурацію оптичної системи, порошкових бункерів, будівельної платформи та інертної атмосфери.

Попри очевидні переваги, металеві адитивні процеси супроводжуються широким спектром дефектів, які безпосередньо впливають на експлуатаційні властивості виробів. У оглядових публікаціях [1, 2] до найпоширеніших відносять газову та ключову пористість, зони неповного плавлення, мікротріщини, локальні перегріви, а також виражену анізотропію структури. У табл. 1 узагальнено основні типи дефектів, їх характерні прояви, чинники виникнення та наслідки для механічних властивостей. Видно, що значна частина дефектів пов'язана не тільки з вибраним матеріалом, а й із сукупністю технологічних факторів: морфологією порошку, якістю нанесення шару, стабільністю ванни розплаву (melt-pool), стратегією сканування та режимами охолодження [2, 4].

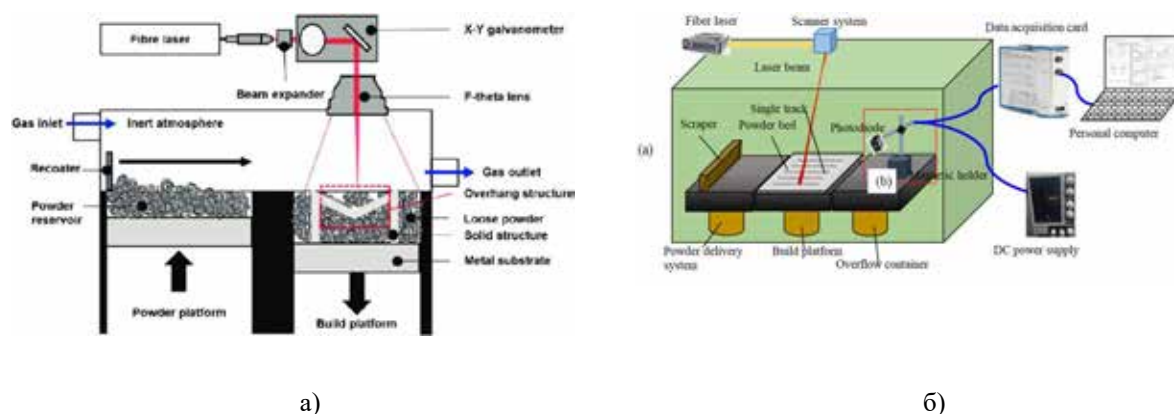


Рис. 1. Приклади сучасних адитивних технологій: а) – узагальнена схема процесу лазерного плавлення металевих порошків; б) – схема системи in-situ моніторингу процесу LPBF із використанням фотодіода для реєстрації випромінювання melt-pool [2, 17]

Таблиця 1

Основні типи дефектів у металевому адитивному виробництві та чинники їх виникнення

Тип дефекту	Характеристика	Основні причини	Наслідки для властивостей
Газова пористість	Дрібні сферичні пори	Захоплення газу, домішки, дегазація порошку	Зниження міцності, підвищена втомна чутливість
Ключова пористість	Витягнуті пори, тунельні порожнини	Надлишкова енергія, ключовий режим плавлення	Крихке руйнування, виникнення тріщин
Неповне плавлення	Непроварені ділянки між треками/шарами	Низька потужність лазера, надмірна швидкість сканування	Різне зниження міцності, локальні концентрації напружень
Мікротріщини	Тріщини в областях високих градієнтів	Термічні напруження, неправильна стратегія сканування	Крихке руйнування, поширення тріщин
Анізотропія структури	Текстурована, напрямна структура зерен	Однобічна стратегія сканування, несиметричне охолодження	Різні властивості в різних напрямках деталі

На рівні сировини критичними є розподіл розмірів частинок, форма та стан поверхні порошку. Надто широкий гранулометричний спектр або значна кількість деформованих частинок призводять до погіршення реології шару, утворення локальних зон пониженої щільності, що, у свою чергу, змінює поглинання енергії та режим плавлення [1, 2]. Для ілюстрації в роботі використано зображення металевих порошків та результатів його оброблення алгоритмами комп'ютерного зору (рис. 2), де показано сегментацію частинок і класифікацію їх за формою. Сучасні дослідження демонструють, що на основі таких зображень можна обчислювати показники сферичності, ексцентриситет, шорсткість поверхні та будувати інтегральні критерії придатності партії порошку [1, 3, 10].

Застосування згорткових нейронних мереж (ResNet, EfficientNet тощо) для аналізу зображень порошкових розсіпів стало окремим напрямом інтелектуального контролю. У працях [3, 6, 10] показано, що багатокласові класифікатори розрізняють частинки типу «придатні», «деформовані», «агломеровані», «забруднені» та формують індекси якості партій. На основі морфологічних характеристик і результатів випробувань надрукованих зразків будують регресійні моделі, які дозволяють оцінювати пористість і міцність ще до початку друку [6, 10]. У [3, 10] візуальні ознаки поєднують з даними про хімічний склад і вологість у мультиканальних моделях, що підвищує точність контролю при багаторазовому використанні порошку.

Другий напрям стосується інтелектуального контролю самого процесу побудови деталі. В установках LPBF застосовують комплекси оптичних і тепловізійних камер, фотодіодів та іноді акустичних сенсорів [3, 4, 7]. На основі цих даних оцінюють геометрію melt-pool, розподіл температури, стабільність режиму плавлення та виявляють перегрів й зони неповного проплавлення. Узагальнену структуру системи in-situ моніторингу із фотодіодом для реєстрації випромінювання melt-pool наведено на рис. 1. Сенсор розташовують так, щоб він «бачив» зону друку, а сигнал обробляють у реальному часі.

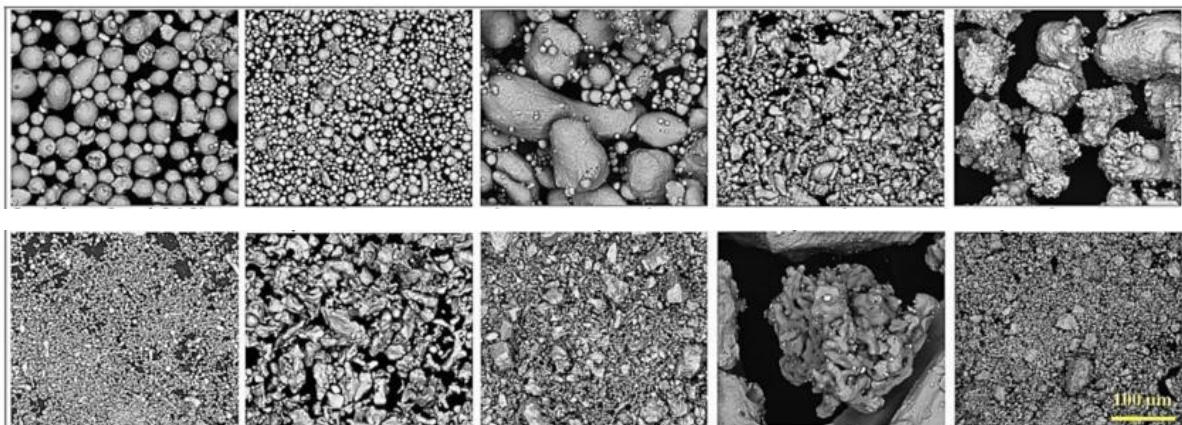


Рис. 2. Приклад морфології металевих порошків та результат сегментації частинок [18]

У [4, 5] зображення melt-pool кожного треку перетворюють на набір геометричних та фотометричних ознак, які подають на вхід класифікатора. При використанні глибоких згорткових мереж модель навчається безпосередньо на термограмах або відеокадрах. Показано, що такі підходи з високою достовірністю розрізняють стабільний режим, режим зі схильністю до утворення газових пор та режим неповного плавлення [3, 4, 7]. Оброблення часових рядів інтенсивності випромінювання чи акустичних сигналів із застосуванням LSTM, GRU та TCN дає змогу прогнозувати майбутній стан melt-pool і виявляти аномалії до формування дефектів [5, 10]. Для інтеграції оптичних, ІЧ та акустичних даних пропонуються моделі зі спільним простором ознак, що підвищує стійкість до шумів; окремі роботи демонструють реалізацію замкненого контуру керування, коли за виявленням відхилень автоматично коригують параметри процесу [3, 7].

Третій напрям пов'язаний із застосуванням глибокого навчання для безпосереднього прогнозування пористості та дефектів. У [5, 6, 8] термограми, карти інтенсивності, розподіли потужності та швидкості сканування узгоджують із даними рентгеновської комп'ютерної томографії, після чого нейронні мережі навчають оцінювати пористість по шарах і в об'ємних фрагментах деталі. Використовують як двовимірні моделі з механізмом уваги [5], так і тривимірні згорткові мережі, що повертають просторові карти розташування пор [6, 8]. Окремий клас робіт спрямований на прогноз механічних властивостей: поєднання інформації про пористість, розмір зерен, текстуру та залишкові напруження в єдиній моделі дає змогу оцінювати границю втомної та статичної міцності без повного комплексу випробувань [6, 10], що розглядають як основу віртуальної сертифікації відповідальних виробів.

Паралельно розвивається концепція цифрових двійників адитивних процесів. У працях [7, 11–13, 15] цифровий двійник LPBF/SLM описують як сукупність термічних, механічних та мікроструктурних моделей, синхронізованих із реальним процесом друку. Їх застосовують для прогнозування полів температур, залишкових напружень, деформацій та еволюції мікроструктури, а також для оптимізації орієнтації деталей, систем підтримок і стратегії сканування. Частина авторів пропонує гібридні схеми, де результати чисельного моделювання використовують як джерело синтетичних даних для навчання нейронних мереж, а самі мережі потім застосовують для швидкого прогнозування якості в режимі, наближеному до реального часу [7, 12].

Разом узяті, ці дослідження демонструють перехід від локальних рішень (аналіз окремих дефектів чи лише одного етапу процесу) до комплексних інтелектуальних систем контролю якості. Водночас проблема інтеграції аналізу порошків, in-situ моніторингу, цифрових двійників та мікроструктурної валідації в єдину архітектуру для відповідальних машинобудівних деталей залишається недостатньо опрацьованою, що й зумовлює актуальність даного дослідження.

Формулювання мети дослідження

Розглянути можливість застосування концепції цифрових двійників щодо аналізу структури і властивостей матеріалів та готових виробів, отриманих пошаровим формоутворенням в адитивних технологіях. Встановити взаємозв'язок ступеня ефективності препроцесорної підготовки засобами смартизації технологічних процесів адитивного виробництва з комплексом показників якості і технічних вимог, які пред'являються до відповідальних деталей у машинобудуванні, отриманих методами пошарового осадження матеріалу.

Викладення основного матеріалу дослідження

З огляду на результати огляду можна виділити декілька ключових напрямів, які доцільно інтегрувати в єдину інтелектуальну систему визначення характеристик якості металевих виробів. Перший напрям пов'язаний із застосуванням цифрових двійників адитивних процесів. Цифровий двійник розглядають як сукупність взаємопов'язаних термічних, механічних та, за потреби, мікроструктурних моделей, що відтворюють перебіг

процесу побудови деталі в часі [7, 11–13, 15]. Теплова підсистема описує поглинання енергії, розподіл температур і швидкість охолодження; механічна – формування залишкових напружень і деформацій; мікроструктурна – еволюцію фазового складу, розміру зерен та текстури. Такі моделі дають змогу оцінювати чутливість якості виробів до зміни параметрів друку ще до проведення експериментів.

У низці робіт [7, 11] цифровий двійник використано для оптимізації орієнтації деталі на платформі, конфігурації системи підтримок і стратегії сканування з метою мінімізації деформацій та концентрацій напружень. Для задачі забезпечення якості важливо, що цифровий двійник дозволяє виконувати багатоваріантні розрахунки, визначати зони потенційних перегрівів, накопичення напружень та зниженої щільності, а також прогнозувати мікроструктурні особливості. Це створює передумови для формування «віртуального процесного вікна», у межах якого ймовірність виникнення критичних дефектів є мінімальною.

Поєднання цифрового двійника з методами машинного навчання реалізують у вигляді гібридних моделей. У роботах [7, 12] результати чисельного моделювання використовують як джерело синтетичних даних для навчання нейронних мереж, що надалі застосовуються для швидкого прогнозування температурних полів, напружень або показників якості в режимі, наближеному до реального часу. В інших підходах ML-моделі використовують для апроксимації розв'язку складних фізичних задач, зменшуючи обчислювальні витрати класичних методів [11]. У будь-якому випадку метою є створення інструмента, який поєднує фізичну обґрунтованість цифрового двійника та обчислювальну ефективність моделей глибокого навчання.

Наступний важливий блок стосується ролі мікроструктурного аналізу та фрактографії в системі інтелектуального контролю якості. Металографічні дослідження, рентгенівська комп'ютерна томографія, сканувальна електронна мікроскопія та аналіз зламів дають змогу безпосередньо спостерігати розподіл пор, структуру зерен, наявність мікротріщин та вторинних фаз [9, 10]. У роботах [9, 10] показано, що суміщення карт пористості з фрактографічним аналізом дозволяє встановити, які саме дефекти є критичними для втомної міцності, а які мають другорядний вплив. Для інтелектуальної системи ці дані виконують роль еталонної інформації (ground truth), необхідної для навчання й валідації моделей, що прогнозують структуру та властивості виробів.

У промислових умовах обсяг мікроструктурного аналізу, як правило, обмежений через високу вартість та тривалість досліджень. Тому особливого значення набувають методи transfer learning та domain adaptation, які дозволяють переносити знання, отримані на відносно невеликій кількості детально вивчених зразків, на ширший спектр деталей, для яких доступні переважно дані in-situ моніторингу [3, 6]. Таким чином, традиційні матеріалознавчі методи не витісняються інтелектуальними підходами, а інтегруються з ними в єдиний контур.

З урахуванням наведених підходів доцільно запропонувати інтегровану архітектуру інтелектуальної системи визначення характеристик якості металевих виробів, що охоплює всі етапи життєвого циклу адитивного виробу – від аналізу сировини до постпроцесної валідації. Узагальнену структурну схему такої системи наведено на рис. 5. У ній виділено кілька взаємопов'язаних модулів, між якими організовано обмін даними й результатами прогнозів.

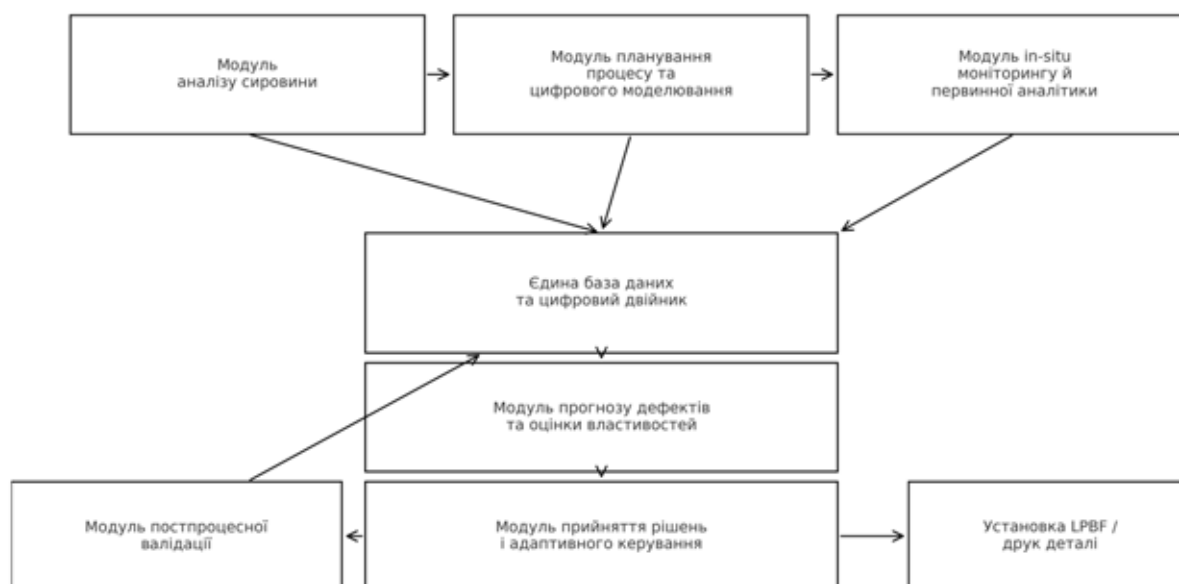


Рис. 3. Структурна схема інтегрованої інтелектуальної системи контролю якості

Модуль аналізу сировини приймає зображення порошку, результати хімічного аналізу та історичні дані використання партій. На основі алгоритмів комп'ютерного зору та моделей машинного навчання він оцінює

морфологію частинок, виявляє деформовані й агломеровані об'єкти, формує інтегральні показники придатності порошкової суміші та рекомендації щодо змішування або відбракування [1, 3, 6]. Тим самим на вході технологічного ланцюга зменшується ймовірність потрапляння сировини, що з високою ймовірністю призведе до утворення дефектних виробів.

Модуль планування процесу та цифрового моделювання відповідає за вибір стратегії сканування, орієнтації деталі на платформі, конфігурації підтримок і основних параметрів друку. Він взаємодіє з цифровим двійником, який виконує багатоваріантні розрахунки температурних полів, напружень та деформацій, оцінює ризики перегрівів, надмірних деформацій і зон потенційної пористості [7, 11–13]. Результати моделювання використовуються як вхідні дані для уточнення параметрів процесу й формування початкового «плану якості» для конкретної деталі.

Модуль in-situ моніторингу та первинної аналітики збирає дані з високошвидкісних оптичних і тепловізійних камер, фотодіодів та, залежно від конфігурації устаткування, акустичних сенсорів [3, 4, 7]. На цьому рівні виконується попередня обробка сигналів (фільтрація, нормалізація, виділення базових ознак) та передавання їх до моделей глибокого навчання, які класифікують режими плавлення, виявляють аномалії melt-pool і формують локальні карти ризику дефектів по шарах.

Модуль прогнозу дефектів і оцінки властивостей об'єднує дані in-situ моніторингу з результатами цифрового моделювання. Тут реалізуються моделі, що за картами температури, історією потужності та швидкості сканування, а також ознаками, отриманими з цифрового двійника, прогнозують пористість, розподіл дефектів, локальну міцність і залишкові напруження [5, 6, 8, 15]. Формально задача прогнозування пористості розглядається як побудова регресійної моделі

$$P(x) = 1 - \dots$$

де $P^{\wedge}$ – прогнозована сумарна пористість або її локальні значення в елементі об'єму, x – вектор вхідних ознак (лінійна щільність енергії E_L , товщина шару, параметри стратегії сканування, індекс якості порошку Q_{pow} , ознаки з термограм та сигналів фотодіода), θ – параметри моделі (ваги нейронної мережі). Навчання моделі виконується шляхом мінімізації середньоквадратичної похибки

$$L(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Pi_i - \hat{\Pi}_i)^2,$$

де Π_i – експериментально виміряна пористість для i -го зразка, $P^{\wedge}_i = f_{\theta}(x_i)$ – відповідне прогнозне значення [5–8]. Зменшення функції втрат на етапі навчання прямо пов'язане з підвищенням точності оцінювання якості в експлуатаційних режимах.

На виході формується інтегральна «карта якості» виробу, яка може використовуватися як для оперативного керування, так і для подальшої віртуальної сертифікації.

Модуль прийняття рішень і адаптивного керування порівнює прогнозовані показники якості з допустимими нормами для конкретного типу деталей. У разі виявлення зон із підвищеним ризиком дефектів система може автоматично скоригувати потужність лазера, швидкість сканування, локально змінити траєкторію або, за потреби, ініціювати перерозподіл завдань між установками [3, 7]. У перспективі такий модуль може взаємодіяти із системами більш високого рівня – планування виробництва й управління ресурсами – пропонуючи зміни в технології або переналаштування лінії.

Модуль постпроцесної валідації включає мікроструктурний аналіз, рентгенівську комп'ютерну томографію та механічні випробування вибіркового зразків. Його завдання – перевірити коректність прогнозів, виявити систематичні відхилення та надати дані для донавчання моделей. Результати цього модуля повертаються в базу знань, коригують параметри цифрового двійника та ваги моделей машинного навчання, забезпечуючи поступове підвищення точності прогнозів і стійкості системи до нових типів виробів і матеріалів [3, 7, 15].

Таким чином, запропонована структура інтегрованої інтелектуальної системи дозволяє об'єднати в єдиному інформаційному просторі дані про порошок, параметри процесу, результати in-situ моніторингу, моделювання та постпроцесні вимірювання. Це створює основу для побудови самонавчальних адитивних виробничих комплексів, у яких рішення щодо забезпечення якості приймаються на основі поєднання фізично обґрунтованих моделей і інтелектуального аналізу даних.

Висновки

На основі аналізу сучасних публікацій сформовано цілісне уявлення про інтелектуальні технології визначення характеристик якості металевих виробів, виготовлених методами пошарового утворення. Показано, що застосування машинного навчання та комп'ютерного зору на етапах аналізу порошку й in-situ моніторингу melt-pool дозволяє автоматизувати виявлення аномалій процесу та оцінювати ризики формування дефектів. Глибокі нейронні мережі, що працюють із термограмами та томографічними даними, забезпечують прогноз пористості й структурних аномалій з точністю, достатньою для практичного використання. Цифрові двійники адитивних процесів

створюють можливість виконувати багатоваріантний аналіз і оптимізацію параметрів друку до початку експериментів, а їх інтеграція з ML-моделлями формує основу замкненого контуру керування якістю. Мікроструктурний аналіз і фрактографія залишаються невід'ємними для навчання та валідації моделей, але можуть бути значно ефективніше використані в рамках запропонованої інтегрованої архітектури. Запропонована модель інтелектуальної системи визначення характеристик якості охоплює всі етапи – від сировини до постпроцесної обробки – й дозволяє розглядати металеве адитивне виробництво як елемент кіберфізичної виробничої системи Індустрії 4.0. Подальші дослідження доцільно спрямувати на формування відкритих датасетів, стандартизацію метрик якості та розробку методів пояснюваного машинного навчання для підвищення довіри до інтелектуальних систем у промислових застосуваннях.

Список використаної літератури

1. Yeshiwas T. A., Tirunch A. B., Sisay M. A. A review article on the assessment of additive manufacturing. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*. 2025. DOI: 10.1186/s40712-025-00306-8.
2. Gao B., Wu D., Wang Y. et al. A review of research progress in selective laser melting (SLM). *Micromachines*. 2023. Vol. 14, No. 1, 57. <https://www.mdpi.com/2072-666X/14/1/57>
3. Hu Z., Gao X., Li Y. et al. Machine learning assisted quality control in metal additive manufacturing: a review. *Advanced Powder Materials*. 2025. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772834X25000788>
4. He W., Zhu L., Liu C., Jiang H. Metal additive manufacturing and molten pool dynamic characterization monitoring: advances in machine learning for DED. *Metals*. 2025. Vol. 15, No. 2, 106. <https://www.mdpi.com/2075-4701/15/2/106>
5. Oster S., Breese P. P., Ulbricht A., Mohr G., Altenburg S. J. A deep learning framework for defect prediction based on thermographic in-situ monitoring in laser powder bed fusion. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2024. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-deep-learning-framework-for-defect-prediction-on-Oster-Breese/6ed6b2496fa689d99c9a716ab873dce3b87f36a6>
6. Mohammed A. S., Almutahhar M., Sattar K. et al. Deep learning based porosity prediction for additively manufactured laser powder-bed fusion parts. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 27, p. 7330–7335. <https://pure.kfupm.edu.sa/en/publications/deep-learning-based-porosity-prediction-for-additively-manufactur/>
7. Ben Amor S., Brissaud D., Rivette M. Digital twin implementation in additive manufacturing: A comprehensive review. *Processes*. 2024. Vol. 12, No. 6, 1062. <https://www.mdpi.com/2227-9717/12/6/1062>
8. Tudorache L., Mihai A., Constantin G. et al. Current approaches to digital twins in additive manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40964-025-01262-7>
9. Fousová M., Vojtěch D., Kubásek J. et al. Metallographic and fractographic evaluation of 3D-printed titanium samples. *Solid State Phenomena*. 2017. Vol. 258, p. 171–176. <https://www.scientific.net/SSP.270.212>
10. Попов О. І. Упровадження штучного інтелекту для прогнозування властивостей металевих матеріалів. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2024. https://www.researchgate.net/publication/384482833_Uprovadzenna_stucnogo_intelektu_dla_prognozuvanna_vlastivostej_metalevih_materialiv
11. Liu C., Zhang Q., Zhang J. et al. Digital Twin-enabled Collaborative Data Management for Metal Additive Manufacturing Systems. 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278612520300741>
12. Phua A., Masood S. H., Ruan D. A digital twin hierarchy for metal additive manufacturing. *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 107, p. 530–535. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361522000641>
13. Chheang V., Aremu A., Wu S. et al. Enabling additive manufacturing part inspection of digital twin... *Scientific Reports*. 2024. <https://www.nature.com/articles/s41598-024-80541-9>
14. Lu Y., Slotwinski J. A., Moylan S. et al. An overarching quality evaluation framework for additive manufacturing in the context of digital twins. NIST, 2023. manuela-project.eu
15. Gaikwad A. Smart Additive Manufacturing: Sensing, Monitoring, and Machine Learning for Quality Assurance in Metal AM. PhD thesis. University of Nebraska–Lincoln, 2022. <https://digitalcommons.unl.edu/dissertations/AAI29322978/>
16. Тригубов О. В. Чисельне моделювання та цифрові двійники в процесах WAAM для керування якістю. *Міжнародний науковий журнал «Механіка та машинобудування»*. 2025. <https://www.proquest.com/openview/f0d6f7f5f315e5038f3eda11ce15e994/1?cbl=18750&diss=y&pq-origsite=gscholar>
17. Cao L., Hu W., Zhou T., Yu L., Huang X. Monitoring of Single-Track Melting States Based on Photodiode Signal during Laser Powder Bed Fusion. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 24, 9793. DOI: 10.3390/s23249793.
18. Zegzulka J., Gelnar D., Jezerska L., Ramirez-Gomez A., Necas J., Rozbroj J. Internal Friction Angle of Metal Powders. *Metals*. 2018. Vol. 8, No. 4, 255. DOI: 10.3390/met8040255.

References

1. Yeshiwas, T. A., Tirunch, A. B., & Sisay, M. A. (2025). A review article on the assessment of additive manufacturing. *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*.
2. Gao, B., Wu, D., & Wang, Y. (2023). A review of research progress in selective laser melting (SLM). *Micromachines*, 14(1), 57.
3. Hu, Z., Gao, X., Li, Y., & others. (2025). Machine learning assisted quality control in metal additive manufacturing: A review. *Advanced Powder Materials*.
4. He, W., Zhu, L., Liu, C., & Jiang, H. (2025). Metal additive manufacturing and molten pool dynamic characterization monitoring: Advances in machine learning for DED. *Metals*, 15(2), 106.
5. Oster, S., Breese, P. P., Ulbricht, A., Mohr, G., & Altenburg, S. J. (2024). A deep learning framework for defect prediction based on thermographic in-situ monitoring in laser powder bed fusion. *Journal of Intelligent Manufacturing*.
6. Mohammed, A. S., Almutahhar, M., Sattar, K., Alhajeri, A., Nazir, A., & Ali, U. (2023). Deep learning based porosity prediction for additively manufactured laser powder-bed fusion parts. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 7330–7335.
7. Ben Amor, S., Brissaud, D., & Rivette, M. (2024). Digital twin implementation in additive manufacturing: A comprehensive review. *Processes*, 12(6), 1062.
8. Tudorache, L., Mihai, A., Constantin, G., & others. (2025). Current approaches to digital twins in additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
9. Fousova, M., Vojtech, D., Kubasek, J., & others. (2017). Metallographic and fractographic evaluation of 3D-printed titanium samples. *Solid State Phenomena*, 258, 171–176.
10. Popov, O. I. (2024). Implementation of artificial intelligence for predicting the properties of metallic materials. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*.
11. Liu, C., Zhang, Q., Zhang, J., & others. (2020). Digital twin-enabled collaborative data management for metal additive manufacturing systems.
12. Phua, A., Masood, S. H., & Ruan, D. (2022). A digital twin hierarchy for metal additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 107, 530–535.
13. Chheang, V., Aremu, A., Wu, S., & others. (2024). Enabling additive manufacturing part inspection of digital twin. *Scientific Reports*.
14. Lu, Y., Slotwinski, J. A., Moylan, S., & others. (2023). An overarching quality evaluation framework for additive manufacturing in the context of digital twins. *NIST Technical Note*.
15. Gaikwad, A. (2022). *Smart additive manufacturing: Sensing, monitoring, and machine learning for quality assurance in metal AM* (Doctoral dissertation, University of Nebraska–Lincoln).
16. Tryhubov, O. V. (2025). Numerical modelling and digital twins in WAAM processes for quality control. *Mechanics and Machine Building International Scientific Journal*.
17. Cao L., Hu W., Zhou T., Yu L., Huang X. Monitoring of Single-Track Melting States Based on Photodiode Signal during Laser Powder Bed Fusion. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 24. 9793. DOI: 10.3390/s23249793.
18. Zegzulka J., Gelnar D., Jezerska L., Ramirez-Gomez A., Necas J., Rozbroj J. Internal Friction Angle of Metal Powders. *Metals*. 2018. Vol. 8, No. 4. 255. DOI: 10.3390/met8040255.

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 18.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

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

Г. М. МИХАЙЛОВА

доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри товарознавства та митної справи
Державний торговельно-економічний університет
ORCID: 0000-0002-1083-5875

ПІДВИЩЕННЯ ОДНОРІДНОСТІ ЕЛАСТИЧНОЇ ШКІРИ З КІНСЬКОЇ СИРОВИНИ

Метою роботи є підвищення однорідності еластичної шкіри з кінської сировини при використанні синтанно-танідної композиції з алкілкарбоксиетанолами аліфатичних кислот C_{7-9} в процесах рідинного оздоблювання. У роботі використано зразки площею 25 дм² напівфабрикату хромового дублення з кінської сировини з різних топографічних ділянок – спини, шиї та черева, що відрізняються значною неоднорідністю. Симетрично хребтовій лінії відібрані контрольні зразки.

У роботі проведено дослідження комплексу фізико-хімічних властивостей шкіри з кінської сировини з використанням синтанно-танідної композиції з алкілкарбоксиетанолами аліфатичних кислот C_{7-9} на стадії рідинного оздоблювання напівфабрикату хромового дублення. Водночас оцінена однорідність отриманого матеріалу за коефіцієнтом рівномірності. Визначення хімічного складу шкіри за топографічними ділянками дало можливість встановити збільшення вмісту дубильних речовин органічної природи в ділянках з меншою щільністю. При цьому спостерігається незначне підвищення товщини в цих же ділянках. Ефективне наповнення об'єму шкіряного напівфабрикату при використанні синтанно-танідної композиції з алкілкарбоксиетанолами забезпечує збільшення виходу площі матеріалу на 3,4 %. За коефіцієнтом рівномірності отримані шкіри характеризуються високою однорідністю деформаційних властивостей всіх топографічних ділянок, що сприяє ефективному розкроюванню деталей для верху взуття при виготовленні виробів широкого асортименту. Порівняно з промисловою технологією отримані шкіри мають вищий коефіцієнт рівномірності деформаційних властивостей на 21,0 %. Це дає підставу рекомендувати склад синтанно-танідної композиції для апробації в промислових умовах на стадії рідинного оздоблювання.

Ключові слова: напівфабрикат шкур коней, наповнювання, обладнання шкіряного виробництва, синтанно-танідна композиція, алкілкарбоксиетанолами, фізико-хімічні властивості шкіри.

А. Н. DANYLKOYCH

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

О. А. 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

H. M. MYKHAILOVA

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Commodity Science and Customs Affairs
State University of Trade and Economics
ORCID: 0000-0002-1083-5875

ENHANCING THE UNIFORMITY OF ELASTIC LEATHER FROM EQUINE HIDES

The objective of this work is to enhance the uniformity of elastic leather made from equine hides by using a syntan-tannin composition with C₇₋₉ aliphatic acid alkylcarboxyethanolamines in the wet-finishing processes. For this study, we used samples of chrome-tanned semi-finished leather (wet-blue) from equine hides, each measuring 25 dm², taken from various topographical areas, including the back, neck, and belly, which are characterised by significant non-uniformity. Control samples were symmetrically taken along the spine line. The study investigated the complex of physicochemical properties of leather from equine hides using the syntan-tannin composition with alkylcarboxyethanolamines of C₇₋₉ aliphatic acids during the wet-finishing stage of the chrome-tanned semi-finished product. Simultaneously, the uniformity of the resulting material was evaluated using the coefficient of uniformity. Determining the chemical composition of the leather across the topographical areas allowed us to establish an increase in the content of organic tanning agents in regions with lower density. A slight increase in thickness was also observed in these same areas. The effective filling of the volume of the leather semi-finished product, achieved by employing a syntan-tannin composition with alkylcarboxyethanolamines, results in a 3.4% increase in the material's area yield. Based on the coefficient of uniformity, the produced leathers are characterised by high uniformity of deformation properties across all topographical areas. This facilitates the efficient cutting of components for shoe uppers in the manufacture of a wide range of products. Compared to industrial technology, the resulting leathers have a 21.0% higher coefficient of uniformity for deformation properties. This provides a basis for recommending the syntan-tannin composition for industrial trials at the wet-finishing stage.

Key words: Equine hide semi-finished product, retanning, leather production equipment, syntan-tannin composition, alkylcarboxyethanolamines, physicochemical properties of leather.

Постановка проблеми

Виробництво натуральної шкіри з однорідними властивостями по всім топографічним ділянкам одна з найскладніших задач у шкіряній промисловості. Ця складність обумовлюється значними природними відмінностями у структурі різних топографічних ділянок шкури, їх товщиною та властивостями. Неоднорідність властивостей вказаних ділянок шкіри може призвести до отримання на одній шкірі різного результату при здійсненні механічної обробки: тиснення, нарізки, пресування, шліфування. Під час оздоблювання шкіри може спостерігатися різнотон забарвлення, плямистість, провалювання апретури тощо. Слід зауважити, що при розкроюванні деталей із шкіряних матеріалів враховуються щільність структури, рівень її міцності, м'якості та еластичності. Якщо вказані властивості різко відрізняються при розкроюванні однієї шкіри, то коефіцієнт розкрійності падає, а обсяг лоскуту зростає. А отже, розроблення технологій, спрямованих на отримання шкіряних матеріалів з однорідними властивостями по всім топографічним ділянкам, дозволить не тільки забезпечити комплекс необхідних фізичних, фізико-механічних та естетичних характеристик, а і високі експлуатаційні властивості виробів із даної шкіри за умови мінімізації твердих колагенвмісних відходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Результати дослідження колоїдно-хімічних особливостей взаємодій хімічних реагентів різного хімічного складу з колагеном дерми шкіряного напівфабрикату при його наповнюванні та фізико-хімічні властивості отриманих матеріалів наведені в ряді робіт. У роботі [1] представлені результати дослідження впливу полімерів: фенолформальдегіду PFR, мелаїноформальдегіду MFR, акрилату AR та біополімеру ВР на комплекс фізико-хімічних властивостей отриманої шкіри. При цьому перший полімер в більшій мірі підвищує міцність шкіряного матеріалу, а полімери на основі мелаїноформальдегіду та біомаси ефективно підвищують відповідно товщину периферійних ділянок, їх щільність і вихід площі. Для підвищення ефективності наповнювання напівфабрикату хромового дублення рекомендують використовувати поліетиленгліколь акрилової кислоти [2], який дифундує в напівфабрикат, блокуючи незв'язані комплекси хрому (III). При підлучуванні середовища цей реагент активно взаємодіє з комплексами хрому (III) і фібрилярною структурою колагену дерми та зшиває її. Це сприяє суттєвому формуванню фізико-хімічних властивостей шкіряного матеріалу.

Дослідженням фізико-хімічних властивостей шкіри з сировини великої рогатої худоби при використанні як наповнювачів синтанів LF-187 та RS-3 [3], отриманих на основі мелаїноформальдегіду і поліакрилату, встановлено, що ефективне оброблення хромового напівфабрикату досягається при використанні синтану RS-3 з витрати 2 % маси напівфабрикату.

Підвищення міцності шкіряного матеріалу досягається використанням алюмосилікату, модифікованого акриловим полімером [4]. При цьому максимальне значення міцності спостерігається за витрати алюмосилікату 5 %. Водночас, шкіряний матеріал отриманий за розробленою технологією має вищі показники наповненості

периферійних ділянок, товщини та еластичності порівняно з матеріалом стандартної технології. Аналогічний ефект підвищення фізико-хімічних властивостей має матеріал отриманий авторами при наповнюванні напівфабрикату нанокмполімером алюмосилікат/акриловий полімер [5]. Результати взаємодії реагентів, до складу яких входять акриловий полімер, меламін і ароматичні сполуки з колагеном шкіряного напівфабрикату описані в роботі [6]. На основі отриманих даних розроблена ресурсоощадна технологія формування хромової шкіри з сировини козлини для верху взуттєвих виробів. При наповнюванні напівфабрикату хромового дублення використано нанокмполімер монтморилоніту, модифікований декозиною кислотою, ріпаковою олією, етилендіаміном та бісульфітом натрію [7]. Встановлено, що при використанні цієї композиції досягається значне підвищення комплексу фізико-механічних властивостей. Ефективним наповнювачем шкіряного напівфабрикату є вторинні ресурси технології виробництва шкіри після її біохімічної деструкції [8]. У роботі [9] наведені результати взаємодії комплексної сполуки поліуретан-поліальдегіду з елементами волокнистої структури напівфабрикату. При цьому досягається підвищення їх хімічної активності щодо барвників і жирувальних реагентів, а також комплексу фізико-хімічних властивостей. Аналогічні ефекти спостерігаються при використанні синтанів і танідів в комплексі з алюмосилікатами [10]. Застосування алюмосилікатів з акриловими полімерами дає можливість зберегти ефект диспергування волокнистої структури напівфабрикату після сушильно-зволожувальних процесів [11] при формуванні шкіряного матеріалу. При цьому отримана шкіра характеризується підвищеною рівномірністю фізико-хімічних властивостей по топографічним ділянкам.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи – підвищення однорідності еластичної шкіри з кінської сировини при використанні синтанно-танідної композиції з алкілкарбоксиетанолами аліфатичних кислот C_{7-9} в процесах рідинного оздоблювання.

Викладення основного матеріалу дослідження

У роботі використано дослідні зразки площею 25 дм² напівфабрикату хромового дублення з кінської сировини консервованої методом тузлукування. Зразки для дослідження відібрані після стругання на стругальній машині непрохідного типу 07577/P1 фірми Svit напівфабрикату на товщину $1,4 \pm 0,1$ мм з різних топографічних ділянок – спини, шиї та черева, що відрізняються значною неоднорідністю. Симетрично хребтовій лінії відібрані контрольні зразки. Напівфабрикат після додублювання мав гідротермічну стійкість 104–105 °С.

Ефективність впливу процесів рідинного оздоблювання на фізико-хімічні властивості шкіри визначали за методиками [12]. Зокрема, вміст води і золи в зразках встановлювали гравіметричним методом після оброблення наважок за температур, °С: 100–105 та 600–750 відповідно. Для визнання оксиду хрому (III) використано йодометричне титрування. Зв'язані органічні дубителі (ЗОД) розраховані за формулою:

$$\text{ЗОД} = 100 - (З + \text{РЕОР} + \text{ВОР} + \text{ГР}),$$

де $З$, РЕОР , ВОР , ГР – масові частки відповідно золи в шкірі ДСТУ ISO 4047:2006, речовин екстрагованих органічними розчинниками ДСТУ EN ISO 20344, водовимивних органічних речовин ДСТУ ISO 4098:2020 та голиної речовини в шкірі ДСТУ ISO 937:2005, яку визначали за загальним азотом після руйнування наважки.

При цьому для встановлення РЕОР використано суміш розчинників тетрахлоретан: трихлоретилен у співвідношенні 1:1 в установці Зайченка з наступним видаленням води при 128–130 °С. Зважування виконували на електронних вагах AXIS AD200 (Польща).

Фізико-механічні властивості отриманої шкіри визначали за допомогою розривної машини моделі РТ-250М при деформуванні зразка одноосісним розтігуванням зі швидкістю $0,09 \text{ м} \cdot \text{хв}^{-1}$. Коефіцієнт рівномірності деформації K_p зразків шкіри розраховували за відношенням значень деформацій поперечних ($\rightarrow$) до поздовжніх ($\uparrow$) щодо хребтової лінії шкіри [13]. Середні значення коефіцієнта рівномірності K_p визначали як середньоарифметичні значення K_p ділянок спини, шиї і черева. Товщину шкіри вимірювали мікрометром марки ТР 25-100 в центрі топографічних ділянок та в чотирьох точках, розташованих в діагонально протилежних напрямках. Площу шкіри визначали на вимірювальній машині електромеханічної дії моделі 07483/P1-3 фірми Svit, Чехія.

Для отримання зразків напівфабрикату використаний лабораторний барабан об'ємом 10 дм³ в умовах кафедри біотехнології, шкіри та хутра Київського національного університету технологій та дизайну. Лабораторний барабан дозволяє змодельовати перебіг фізико-хімічних процесів виробництва при здійсненні рідинних обробок, включаючи інтенсифікацію вказаних процесів та рівномірність обробки робочими розчинами напівфабрикату. Конструкція лабораторного барабану у масштабі відповідає конструктивним особливостям дерев'яних підвісних барабанів фірми «Vallero». А саме наявністю: полиць у бочці барабану, варіатору швидкості, реверсу. Додублені сполуками хрому у підвісному барабані зразки двократно промивали за температур 27 і 35 °С при витратах води по 100 % маси напівфабрикату протягом 10–15 хв. Потім зразки нейтралізували (рис. 1) до рН зрізу 4,8–5,2 та блакитно-синього кольору, знову промивали двічі по 10 хв з підвищенням температури та обробляли ензимами гідролітичної дії бактеріального походження – амілосубтилін (АС) + глюкаваморин (ГМ).

У подальшому на новому розчині напівфабрикат наповнювали при поступовому дозуванні реагентів. При цьому на попередніх підготовчих обробленнях застосовано реагенти фірми Smit Wet End (Нідерланди). Зокрема, акриловий кополімер Syntan RS-540, ароматичну сульфовану кислоту з сіркою і кремнієм Syntan S та Syntan DF-585 на основі діціандіаміду з вмістом лігносульфонату, алюмосилікату, карбонатів. Безпосередньо при додублюванні використано оптимізовану синтанно-танідну композицію [14] складу: безфенольний синтан 2-нафтол-сульфокислоти і діоксидифенілсульфону з формальдегідом усереднений аміаком (НСК-ДОФС), таніди екстрактів мімози (ЕМ) та квебрахо (ЕК) і алкілкарбокситаноламіни аліфатичних кислот C_{7-9} (АКЕА АК).

Фарбувально-жирувальні процеси рідинного оздоблювання виконували у новому технологічному розчині з використанням реагентів фірми Smit Wet End. Зокрема, Syntan FP-124 з вмістом алюмосилікатів і полісахаридів, Synthol LC та YY-707, відповідно натуральних олій та сульфатованих синтетичних жирів з лецитином та спеціальної жирової композиції. При цьому рН жирової емульсії коригували гідроксидом амонію до 7,8–8,2. Як барвники використані коричневий К (Кор-К) і коричневий 345 (К-345) з еголізатором АКЕА АК. Завершували процес наповнювання-жиркування фіксацією реагентів у структурі напівфабрикату алюмокалієвими галунами, модифікованими форміатом натрію, та промивали його зі зниженням температури води. Всі подальші сушильно-звложувальні та оздоблювальні процеси проводили аналогічно контрольним зразкам, які обробляли за технологією Баришівського шкіряного заводу, м. Баришівка [15].

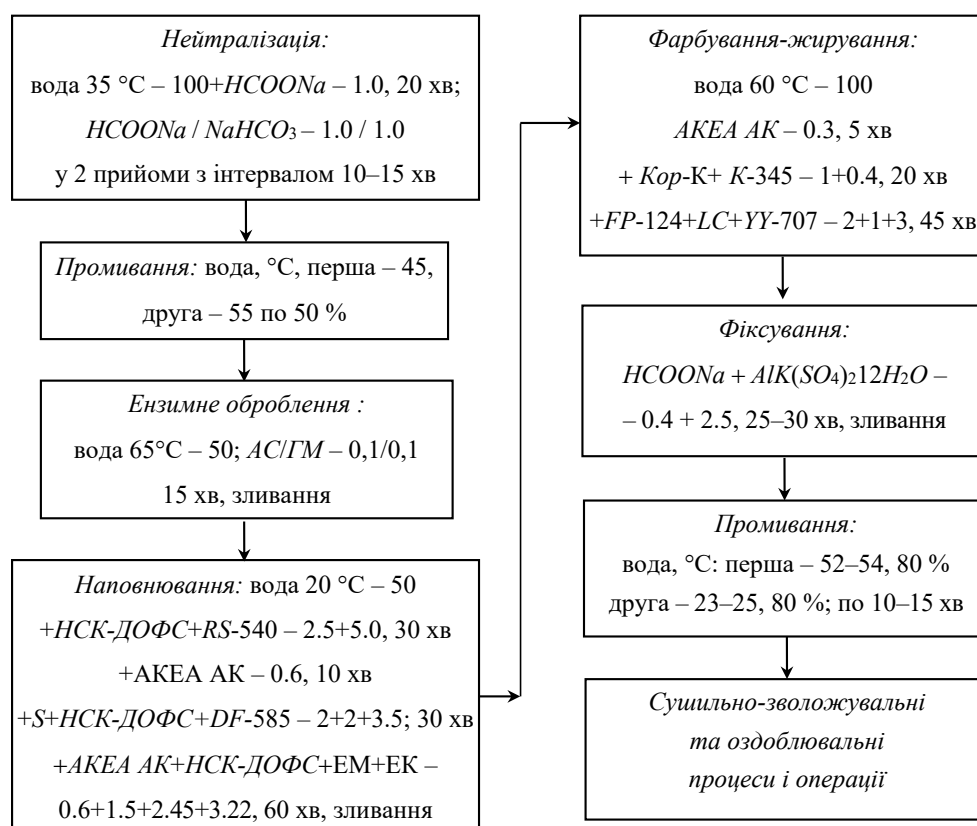


Рис. 1. Технологічна схема процесів рідинного оздоблювання напівфабрикату з кінської сировини

Примітки: Витрати реагентів наведені у % маси напівфабрикату при обертанні барабана зі швидкістю 12–14 хв⁻¹

Для встановлення однорідності шкіри з кінської сировини по топографічним ділянкам проведений комплекс фізико-хімічних досліджень, що включали визначення хімічного складу і фізико-механічних властивостей отриманого матеріалу. Результати дослідження хімічного складу топографічних ділянок шкіри (табл. 1) свідчать про зменшення в них вмісту голиної речовини (ГР) від ділянки спини до черева на 13,7 %. В той час як вміст інших інгредієнтів хімічного складу при цьому збільшується. Це характеризує вищу наповненість периферійних ділянок дослідного матеріалу. Особливо це стосується зв'язаних органічних дубителів, вміст яких підвищується на 67,0 %. При цьому підвищення вмісту водорозчинних речовин становить 17,0 %. В той час як контрольні зразки шкіри в ділянці черева порівняно з ділянкою спини мають більший їх вміст на 27,0 %.

Отже, зразки шкіри отримані за дослідною технологією синтанно-танідного оздоблювання, характеризуються вищою наповненістю периферійних ділянок внаслідок вищого зв'язування в них органічних дубильних речовин.

Таблиця 1

Хімічний склад топографічних ділянок шкіри

Показник	Топографічна ділянка за технологією					
	дослідною			контрольною		
	спина	шия	череву	спина	шия	череву
Масова частка*, %:						
– Cr_2O_3	4,56	4,76	4,91	4,26	4,47	4,74
– золи	7,16	7,48	7,64	7,21	7,64	7,83
– РЕОР	8,92	9,23	9,42	8,46	8,97	9,41
– ВОР	6,48	7,32	7,56	9,04	10,58	11,52
– ЗОД	8,36	9,68	13,97	7,22	8,95	9,12
– голинної речовини	69,08	66,39	61,41	68,07	63,86	60,12

Примітка. *Складові шкіри наведені у перерахунку на нульову вологість.

В процесах рідинного оздоблювання отримується дослідна шкіра з більшою товщиною в ділянці черева (табл. 2) порівняно з ділянкою спини, що свідчить також про формування шкіри вищої рівномірності. Разом з тим шкіри контрольної технології мають тенденцію зменшення товщини в ділянці черева, що пов'язано з меншим вмістом зв'язаних органічних дубителів. Периферійні ділянки шкіри отримані за дослідною технологією мають меншу міцність порівняно з ділянкою спини при дещо вищій товщині. Водночас різниця в міцності між ділянками спини і черева складає лише 2,0 МПа. В той час як цей показник в шкірах контрольної технології є вищим більше ніж у два рази, що може характеризувати вищу однорідність матеріалу дослідної технології. Така шкіра відрізняється більшим виходом площі на 3,4 %.

Таблиця 2

Технологічні властивості шкіри

Показник	Технологія	
	дослідна	промислова
Товщина, мм:		
спина	1,18	1,16
шия	1,21	1,13
череву	1,24	1,10
Границя міцності при розриванні, МПа:		
спина	23,0	22,5
шия	22,1	19,6
череву	21,0	18,2
Вихід площі шкіри, % промислових зразків	103,4	100,0

Однорідність властивостей досліджених шкір визначалась згідно їх деформаційної здатності (табл. 3). Встановлено, що дослідні шкіри мають близькі показники деформацій у поперечному і поздовжньому напрямках. При цьому деформаційна здатність ділянки черева при напруженні 9,81 МПа є більшою на 10,0–14,0 % порівняно з ділянкою спини. Водночас K_p деформаційних властивостей різних топографічних ділянок близький до одиниці. Зразки контрольної технології характеризуються вищою деформаційною здатністю вздовж лінії хребта і, відповідно, K_p є меншим за одиницю. Визначений K_p шкіри, отриманої за дослідною технологією є вищим на 24,0 і 18,0 %, відповідно при навантаженнях 9,81 МПа та розриві.

Таблиця 3

Деформаційні властивості шкіри по топографічним ділянкам

Показник	Зразки дослідні			Зразки промислові		
	орієнтація		K_p	орієнтація		K_p
	→			→		
Видовження при 9,81 МПа, %:						
спина	26,2	26,4	0,99	27,6	35,8	0,79
шия	27,3	27,7	0,96	28,5	36,3	0,77
череву	29,8	29,0	1,03	31,3	37,2	0,84
K_p			0,99			0,80
Видовження при розриві, %:						
спина	57,4	56,9	1,01	62,1	67,5	0,92
шия	58,5	58,8	0,99	61,2	73,8	0,83
череву	59,1	60,0	0,99	60,4	74,7	0,81
K_p			1,0			0,85

Отже, шкіри отримані з використанням синтанно-танідної композиції з алкілкарбоксистаноламинами характеризуються вищою наповненістю периферійних ділянок та однорідністю фізико-хімічних властивостей. Такі шкіри можуть бути використані для виготовлення деталей взуття при раціональному використанні кінської сировини.

Висновки

Проведено дослідження комплексу фізико-хімічних властивостей шкіри з кінської сировини з використанням синтанно-танідної композиції з алкілкарбоксистанолами аліфатичних кислот C_{7-9} на стадії рідинного оздоблювання напівфабрикату хромового дублення і оцінена рівномірність отриманого матеріалу. Визначення хімічного складу шкіри за топографічними ділянками дало можливість встановити збільшення вмісту дубильних речовин органічної природи в ділянках з меншою щільністю. При цьому спостерігається незначне підвищення товщини в цих же ділянках. Ефективне наповнення об'єму шкіряного напівфабрикату при використанні синтанно-танідної композиції з алкілкарбоксистанолами забезпечує збільшення виходу площі матеріалу на 3,4 %. За коефіцієнтом рівномірності отримані шкіри характеризуються високою однорідністю деформаційних властивостей всіх топографічних ділянок, що сприяє ефективному розкроюванню деталей для верху взуття при виготовленні виробів широкого асортименту. Порівняно з промисловою технологією отримані шкіри мають вищий коефіцієнт рівномірності деформаційних властивостей на 21,0 %. Це дає підставу рекомендувати склад синтанно-танідної композиції для апробації в промислових умовах на стадії рідинного оздоблювання. Для реалізації дослідної технології може бути застосовано типове технологічне обладнання шкіряного підприємства.

Список використаної літератури

1. Sathish M. et al. Deciphering the role of individual retanning agents on physical properties of leathers. *JALCA*. 2019. Vol. 114(3). P. 94–102. <https://journals.uc.edu/index.php/JALCA/article/view/1586>
2. Serge E. J., Alla J. P., Belibi P. D. B., Mbadcam K. J., & Fathima N. N. Clay/polymer nanocomposites as filler materials for leather. *J. of Cleaner Production*. 2019. 237 (10). 117837. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117837>
3. Андреева О. А., Первая Н. В., Лошкарьова І. І., Чумакова Н. О. Дослідження властивостей, особливостей структури і технологічних можливостей нових полімерних матеріалів для наповнювання-додублювання шкіри. *Вісник ХНУ. Технічні науки*. 2021. № 3. С. 162–167. <https://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2021/08/26-2.pdf>
4. Wang X., Yan Z., Liu X., Qiang T., Chen L., Guo P., & Yue O. An environmental polyurethane retanning agent with the function of reducing free formaldehyde in leather. *J. of Cleaner Production*. 2018. 207. P. 679–688. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.10.056
5. Kaijun Li, Ruiquan Yu, Ruixin Zhu, Ruifeng Liang, Gongyan Liu, Biyu Peng. pH-Sensitive and Chromium-Loaded Mineralized Nanoparticles as a Tanning Agent for Cleaner Leather Production. *Sustainable Chem. Eng.* 2019. № 7 (9). P. 8660–8669. DOI:10.1021/acssuschemeng.9b00482
6. Первая Н. В., Андреева О. А. Дослідження нових хімічних матеріалів для рідинного оздоблення шкіри. *Вісник ХНУТД*. 2020. № 1(142). С. 71–85. <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/15451>
7. Lyu B., Gao J., Ma J., Gao D., Wang H., & Han X. Nanocomposite based on erucic acid modified montmorillonite/sulfited rapeseed oil : Preparation and application in leather. *Applied Clay Science*. 2016. 121. P. 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.12.021>
8. Constantinescu R. R., Zainescu G. A., Crudu M., & Bostaca G. Retanning Bioagent Used in Leather Processing and Process of Obtaining Thereof. *Rev. Chim. (Bucharest)* 2019. 70 (11). P. 3878–3880. <https://doi.org/10.37358/RC.70.19.11.7663>
9. Xu W., Chai X., Zhao G., Li J., & Wang X. Preparation of reactive amphoteric polyurethane with multialdehyde groups and its use as a retanning agent for chrome-free tanned leather. *Journal of Applied Polymer Science*. 2019. 136(37), 47940. <https://doi.org/10.1002/app.47940>
10. Deniz Gürler Karaman, Gürbüz Gülümser. Possibilities of usage of alkali aluminosilicates as tanning material in chromium-free leather produgtion. *JTATK*. 2016. 26(1). P. 117–124. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/218320>
11. Nanophysics, Nanophotonics, Surface Studies, and Applications: Selected Proceedings of the 3rd International Conference Nanotechnology and Applications. *Springer Proceeding in Physics*. 2016. 183.
12. Данилкович А. Г. Практикум з хімії і технології шкіри та хутра : навчальний посібник, 2 вид., перероб. і доп. Київ : Фенікс, 2006. 340 с.
13. Рибальченко В. В., Коновал В. П., Дрегуляс Е. П. Матеріалознавство виробів легкої промисловості. Методи випробувань : навчальний посібник. Київ : ХНУТД, 2010. 394 с.
14. Данилкович А. Г., Охмат О. А. Оптимізація синтан-танідної композиції для наповнювання еластичного шкіряного матеріалу. *Вісник ХНТУ*. 2025. № 3.
15. Типова технологія виробництва еластичної шкіри Баришівського шкіряного заводу.

References

1. Sathish, M., et al. (2019). Deciphering the role of individual retanning agents on physical properties of leathers. *JALCA*, 114(3), 94–102. <https://journals.uc.edu/index.php/JALCA/article/view/1586>
2. Serge, E. J., Alla, J. P., Belibi, P. D. B., Mbadcam, K. J., & Fathima, N. N. (2019). Clay/polymer nanocomposites as filler materials for leather. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117837. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117837>
3. Andreeva, O. A., Pervaya, N. V., Loshkareva, I. I., Chumakova, N. O. (2021). Research into the properties, structural features and technological capabilities of new polymer materials for filling and duplicating leather. *Bulletin of KhNU. Technical Sciences*, 3, 162–167. <https://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2021/08/26-2.pdf>
4. Wang, X., Yan, Z., Liu, X., Qiang, T., Chen, L., Guo, P., & Yue, O. (2019). An environmental polyurethane retanning agent with the function of reducing free formaldehyde in leather. *Journal of Cleaner Production*, 207, 679–688. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.056
5. Kaijun Li, Ruiquan Yu, Ruixin Zhu, Ruifeng Liang, Gongyan Liu, Biyu Peng. (2019). pH-Sensitive and Chromium-Loaded Mineralized Nanoparticles as a Tanning Agent for Cleaner Leather Production. *Sustainable Chem. Eng*, 7 (9). 8660–8669. DOI:10.1021/acssuschemeng.9b00482
6. Pervaya, N. V., Andreeva, O. A. (2020). Research on new chemical materials for liquid leather finishing. *Bulletin of the KNUTD*, 1(142), 71–85. <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/15451>
7. Lyu, B., Gao, J., Ma, J., Gao, D., Wang, H., & Han, X. (2016). Nanocomposite based on erucic acid modified montmorillonite/sulfited rapeseed oil: Preparation and application in leather. *Applied Clay Science*, 121, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.12.021>
8. Constantinescu, R. R., Zainescu, G. A., Crudu, M., & Bostaca, G. (2019). Retanning bioagent used in leather processing and process of obtaining thereof. *Rev Chim (Bucharest)*, 70(11), 3878–3880. <https://doi.org/10.37358/RC.70.19.11.7663>
9. Xu, W., Chai, X., Zhao, G., Li, J., & Wang, X. (2019). Preparation of reactive amphoteric polyurethane with multialdehyde groups and its use as a retanning agent for chrome-free tanned leather. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(37), 47940. <https://doi.org/10.1002/app.47940>
10. Deniz, Gürler Karaman, Gürbüz, Gülümser. (2016). Possibilities of usage of alkali aluminosilicates as tanning material in chromium-free leather produgtion. *JTATK*, 26(1), 117–124. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/218320>
11. Nanophysics, Nanophotonics, Surface Studies, and Applications: Selected Proceedings of the 3rd International Conference Nanotechnology and Applications. *Springer Proceeding in Physics*, 2016, 183 p.
12. Danylovyh, A. H. (2006). *Praktykum z khimii i tekhnolohii shkiry ta khutra* (Navchalnyi posibnyk, 2nd ed., rev. and suppl.). Feniks. 340 p.
13. Danylovyh, A. H., & Okhmat, O. A. (2025). Optymizatsiia syntan-tanidnoi kompozytsii dlia napovniuvannia elastychnoho shkirianoho materialu. *Visnyk KhNTU*, (3).
14. Rybalchenko, V. V., Konoval, V. P., & Drehulias, E. P. (2010). *Materialoznavstvo vyrobiv lehkoi promyslovosti. Metody vyprobuvan* (Navchalnyi posibnyk). KNUTD. 394 p.
15. *Typova tekhnolohiia vyrobnytstva elastychnoi shkiry Baryshivskoho shkirianoho zavodu.*

Дата першого надходження рукопису до видання: 10.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 08.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

Д. О. ДМИТРІЄВпрофесор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-8200-351X**А. М. КИРИЧЕНКО**професор кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Центральноукраїнський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-4335-9588**М. Ф. КУЗМІЧОВ**аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0003-1501-6865

ТЕХНІЧНІ І ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ В КОМПОНЕТИЦІ ОБЛАДНАННЯ 3D-ДРУКУ МЕТАЛЕВИМИ СПЛАВАМИ

У статті проведено теоретичні дослідження сучасних способів об'ємного формоутворення металевих виробів в контрольованій захисній атмосфері як процесів 3D-друку порошковими матеріалами та присадковим матеріалом у вигляді металевого дроту. Наведено аналіз експериментальних технологій Українських науково-дослідних підприємств, що проходять інтенсивні випробування у сучасному адитивному виробництві для металів і сплавів, проаналізовано останні дослідження у цій сфері. Детально розглянуто вплив технологічних факторів та їх зв'язок з компонувальними властивостями формоутворюючого обладнання на якість фізико-структурних властивостей матеріалу отриманих металевих виробів осадженням додаткового матеріалу в поширових стратегіях їх накладання. Зокрема виконано оцінку ризиків щодо неоднорідності мікро та макроструктури металевих виробів, їх зв'язок з імовірною анізотропією механічних властивостей надрукованих деталей складної геометрії. Запропоновано технічні і технологічні рішення в компонентіці обладнання 3D-друку металевими сплавами, що надають розширення технологічних можливостей адитивних технологій та знижують рівень структурної неоднорідності і анізотропії механічних властивостей в товстостінних деталях. Рішення побудовано за рахунок введення додаткових програмно-керованих кінематичних зв'язків системи орієнтації напрямного пристрою витратного матеріалу та позиціонуючої платформи із підкладкою для поширового укладання розплавленого витратного матеріалу.

Зроблено технічні пропозиції як схемні рішення для керованого застосування електронної гармати в обладнанні 3D-друку, що використовує промінь у формі порожнистого перевернутого конуса з вершиною в зоні формування ванни розплаву на підкладці. Обгрунтовано алгоритми зворотної кінематики для багатопровідних просторових мехатронних систем запропонованих компоновок обладнання 3D-друку як механізмів відносного маніпулювання орієнтації електронної гармати і позиціювання напрямного пристрою витратного матеріалу та переміщення підкладки із сформованими попередньо шарами металу, утримання форми ванни розплаву в зоні осадження на криволінійних поверхнях друкованих металевих виробів.

Ключові слова: адитивне виробництво, 3D-друк, фізико-структурні властивості, компонувальні фактори, обладнання

D. O. DMYTRIIEVProfessor at the Department of Automation, Robotics and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-8200-351X**A. M. KYRYCHENKO**Professor at the Department of Mechanical Engineering, Mechatronics
and Robotics
Central Ukrainian National Technical University
ORCID: 0000-0002-4335-9588

M. F. KUZMICHOV

Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics
and Mechatronics

Kherson National Technical University

ORCID: 0009-0003-1501-6865

TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN THE COMPONENT DESIGN OF METAL ALLOY 3D-PRINTING EQUIPMENT

The article presents theoretical studies of modern methods of volumetric shaping of metallic components in a controlled protective atmosphere, considered as processes of 3D printing using powder materials and filler material in the form of metal wire. An analysis is provided of experimental technologies developed by Ukrainian research and development enterprises, which are currently undergoing intensive testing in contemporary additive manufacturing of metals and alloys, along with a review of recent research in this field. The influence of technological factors and their relationship with the configuration-related properties of shaping equipment on the quality of the physical and structural characteristics of materials in metal parts produced by deposition of supplementary material in layer-by-layer strategies is examined in detail. In particular, risks associated with micro- and macrostructural heterogeneity of metallic components and their correlation with potential anisotropy of the mechanical properties of printed parts with complex geometries are assessed.

Technical and technological solutions are proposed for the component design of metal alloy 3D-printing equipment aimed at expanding the technological capabilities of additive manufacturing and reducing structural heterogeneity and mechanical anisotropy in thick-walled parts. These solutions are based on the introduction of additional software-controlled kinematic linkages within the orientation system of the feedstock guiding device and the positioning platform with a substrate for layer-by-layer deposition of molten material.

Design proposals are also presented as schematic solutions for controlled application of an electron gun in 3D-printing systems that employ a beam shaped as a hollow inverted cone with its apex located in the melt pool formation zone on the substrate. Algorithms of inverse kinematics are substantiated for multi-actuated spatial mechatronic systems of the proposed 3D-printing equipment configurations, functioning as mechanisms for relative manipulation of the electron gun orientation, positioning of the feedstock guiding device, and movement of the substrate with previously formed metal layers, while maintaining melt pool geometry during deposition on curved surfaces of printed metallic components.

Key words: additive manufacturing, 3D printing, physico-structural properties, layout factors, equipment.

Постановка проблеми

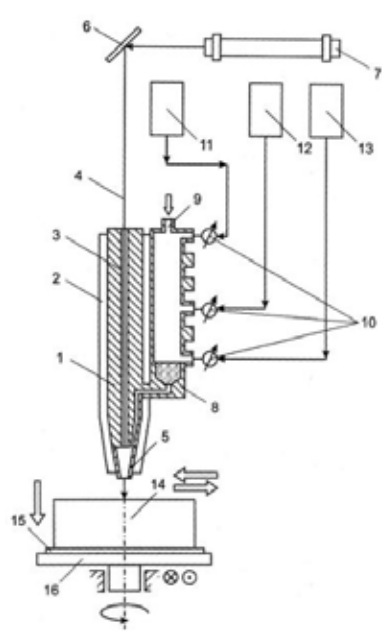
На сьогодні технології адитивного виробництва металевих виробів є надскладними і в той же час стратегічно важливими для України технологічними процесами. Накопичений світовий досвід в промисловості щодо пошарового утворення металевих виробів у авіабудуванні, машинобудуванні та інших галузях промисловості має експериментальний характер і до серійного виготовлення ще повинно бути виконано низку надскладних процедур для встановлення продукції на виробництво [1, 2]. Саме питання контрольованих теплових взаємодій в захисному середовищі утворення шарів металевих сплавів, стратегії накладання шарів для рівноважної мікроструктури, а відповідно усунення анізотропії механічних властивостей в деталях складної форми є важливою задачею, що враховує не тільки режимні параметри процесів 3D друку металів, а технологічну спадковість.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

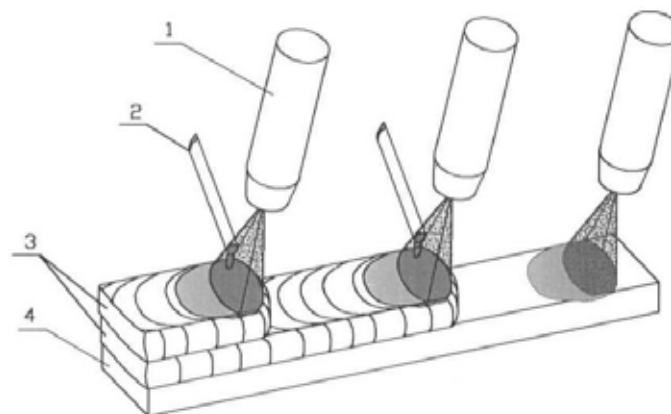
Аналізуючи сучасні дослідження виготовлення деталей пошаровим утворенням металевих сплавів [3, 4, 5, 6, 7], можна відмітити декілька запатентованих способів та експериментальних технологій 3D друку від плавлення порошків до дроту. Головним фактором в керуванні процесами 3D друку металів є процеси, що відбуваються в рухомій ванні розплаву в захисній контрольованій атмосфері. Рахується вже класичним метод селективного лазерного спікання, що включає формування мікроточки рідкого розплаву опаленням потужним лазерним променем поверхні підкладки, вдування струменем інертного транспортуючого газу в розплав металевих порошків (рис. 1, а). Однак на сьогодні розвиваються методи застосування металевих дротів в якості розхідного матеріалу при 3D друку складних виробів. Так в Україні існує спосіб адитивного виробництва металевих 3D-виробів [6], що включає пошарове наплавлення в захисній контрольованій атмосфері шарів матеріалу на утримуючій підкладці знизу до гори, по контуру виробу присадковим дротом, а як джерела нагріву в кожній групі можуть бути електро-дуговий, плазмодуговий чи інші концентровані джерела нагріву, причому по контуру отриманого 3D-виробу одночасно рухається група джерел нагріву, щонайменше три джерела, які розташовані на регульованій відстані один від одного, при цьому до зони дії першого джерела нагріву присадковий дріт не подають, воно лише підігріває підкладку до необхідної температури, а в зоні дії наступних джерел нагріву відбувається формування ванни розплаву та плавлення присадкового дроту (рис. 1, а).

За твердженням авторів [6] такий спосіб для виробництва металевих 3D виробів може бути використаний для ефективного виготовлення якісних високоточних деталей, в умовах де критичними параметрами є габаритні розміри, вага та складність геометричної форми 3D виробу. Однак за рахунок бокової подачі витратного матеріалу

у вигляді дроту в зону сплавлення утворюється затінена зона на підкладці під дротом, що може призвести до утворення пор і порожнин, викликаного осадженням розплавленого витратного матеріалу на нерозплавлену підкладку, що ускладнює управління структурою осадженого матеріалу за рахунок контрольованого затвердіння. Нагрів дроту з однієї сторони – зверху – призводить до його викривлення, що ускладнює точну подачу дроту в зону ванни розплаву. Іншою перспективною технологією адитивного виробництва металевих виробів є спосіб де для формування ванни розплаву на підкладці і розплавлення витратного матеріалу використовують електронний промінь, який безпосередньо генерують у формі порожнистого перевернутого конуса з вершиною в зоні формування ванни розплаву за допомогою електронної гармати з кільцевим катодом під дією регульованої прискорюючої напруги в ній, а витратний матеріал подають в зону формування ванни розплаву через напрямний пристрій, який проходить через внутрішній отвір вказаного кільцевого катода вздовж вертикальної осі вказаного конусного електронного променя [7, 8] (рис. 2, а).

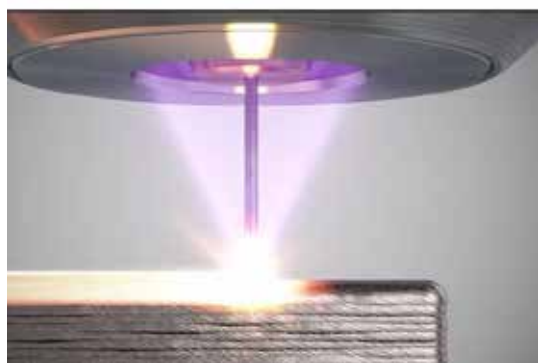


а)



б)

Рис. 1. Приклади адитивних технологій пошарового утворення металевих виробів:
 а) – селективне лазерне плавлення металевих порошків; б) – із застосуванням дроту з нахилом подачі присадкового матеріалу (1 – концентроване джерело нагріву 2 – присадковий дріт; 3 – наплавлений шар; 4 – підкладка) [6]



а)



б)

Рис. 2. Плавлення дроту електронним променем у формі порожнистого перевернутого конуса (а), переміщення зони формування ванни розплаву при пошаровому утворенні виробу (б) [8, 9]

За допомогою електронного променя розплавляють витратний матеріал у вигляді дроту і осаджують отриманий додатковий розплав у ванну розплаву на підкладці, переміщують зону формування ванни розплаву і подачі витратного матеріалу відносно підкладки по заданій оператором або програмою траєкторії (рис. 2, б).

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є теоретичне визначення технічних і технологічних рішень, що можуть бути використані для забезпечення комплексу фізико-структурних показників матеріалів деталей отриманих 3D-друком металевими сплавами та якості їх механічних властивостей за рахунок нових рішень в компоненті програмно-керованого обладнання для адитивних технологій.

Викладення основного матеріалу дослідження

На сьогодні задача забезпечення рівномірної макро і мікроструктури матеріалу в процесі осадження, а відповідно і механічних властивостей металевих 3D-деталей є першочерговою. Для вирішення, пропонується компоновальна схема пристрою (рис. 3) для виготовлення тривимірних об'єктів, який складається з вакуумної технологічної камери 1, електронної гармати 2 з сферичним катодом, витратного матеріалу вигляді металевго дроту 3 наприклад з титану, титанових сплавів, інтерметалічних сполук титану, ніобію, сплавів ніобію, інтерметалічних сполук ніобію, танталу, сплавів танталу, алюмінію, алюмінієвих сплавів, інтерметалічних сполук алюмінію, нікелевих сплавів, кобальтових сплавів, інструментальних сталей, напрямного пристрою 4, металевго підкладки 5 закріпленій на рухомій платформі 6, що зв'язано за допомогою сферичних шарнірів 7 з штангами постійної довжини 8 – 13 та окремими повзунами 14 – 19 по напрямним з серводвигунами Д1 – Д6, що управляються системою ЧПК.

Запропонований пристрій для виготовлення металевих тривимірних об'єктів на відміну від існуючих стратегій формування великої товщини 3D-друкованої деталі накладанням кількох паралельних шарів з перекриттям зони наплавлення дозволяє за допомогою переорієнтації попередньо сформованого шару металу отримувати керовані умови нагрівання та кристалізації витратного матеріалу при осадженні. На металевій підкладці 5 відбувається формування ванни розплаву і осадження витратного матеріалу у вигляді смуг металу, що утворюють вертикальні стінки 3D деталі 21. В технологічній вакуумній камері 1 створюється тиск 10-2 Па, витратний матеріал 3 подається через напрямний пристрій 4 крізь електронну гармату 2 з сферичним катодом на закріплену металеву підкладку 5. Електронні промені розплавляючи розхідний матеріал у вигляді дроту 3 на підкладці 5 формують ванну розплаву і осаджують смуги металу пошарово накладаючи їх одна на одну у вигляді стінки 21 за рахунок переміщення рухомої платформи 6 вниз по координаті Z. Рухомі платформа 6 керується системою ЧПК програмним переміщенням повзунів 14-19 по алгоритмам зворотної кінематики для багатоприводних просторових мехатронних систем. Конструктивно система приводів рухомої платформи 6 складається з шести замкнених до рухомої платформи 6 кінематичних ланцюгів у просторі кожен від окремого серводвигуна і має шість ступенів вільності.

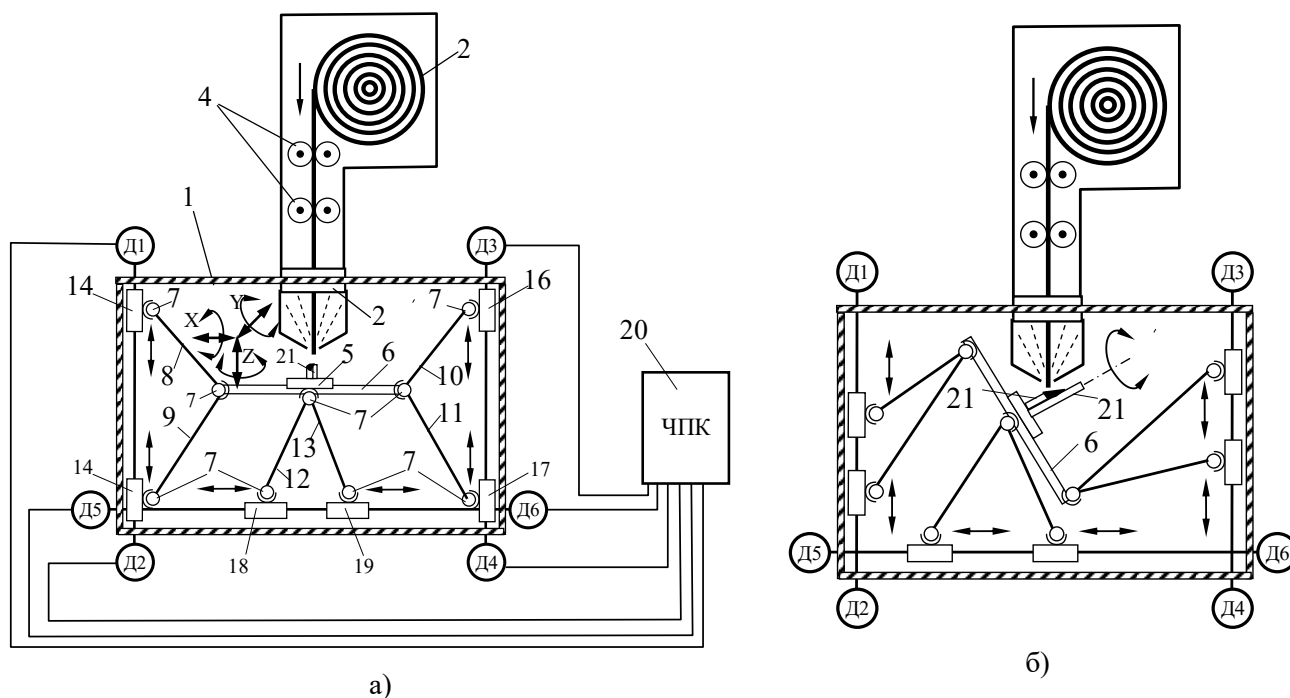


Рис. 3. Компонувальна схема обладнання для пошарового утворення металевих виробів з позиціонуною платформою підкладки у початковому стані (а) та під час орієнтації рухомої ванни розплаву (б)

На рис. 3, б показано позиціонує можливість рухомої платформи 6 із сформованою попередньо вертикально тонкою стінкою 21. Наступні переміщення ванни розплаву відбуваються за іншою стратегією осадження, що передбачає нахил вертикальної стінки 21 під кутом до 85° навколо координатних осей X, Y, Z. Таким чином осадження додаткового матеріалу відбувається на розігріту бічну поверхню попереднього шару або шарів як підкладки металу, формуючи новий шар 22. За допомогою одночасних обертальних рухів рухомої платформи та лінійних переміщень уздовж координатних осей X, Y, Z в робочому просторі пристрою для виготовлення тривимірних металевих об'єктів можливе формування суцільних елементів заданої ширини 3D деталей складної форми, використовуючи типові стратегії для наплавлення у вигляді типових стратегій зиг-заг, штрихування, петля, еквідистанта, спіраль та їх комбінацій. Дане компоновальне рішення дозволить при відповідних технологічних параметрах забезпечити однорідність макро і мікроструктури матеріалу друкованої 3D деталі і відповідно рівномірність механічних властивостей у всіх координатах.

Іншим удосконаленням процесу «мікролиття» в зоні осадження пропонується за рахунок утримання форми ванни розплаву на криволінійних у просторі поверхнях друкованих металевих виробів. В компоновальній схемі (рис. 4, а) пристрою для тривимірного друку металевих виробів в вакуумній камері електронну гармату розташовано на двокоординатному приводі обертання з послідовно з'єднаними серводвигунами, що позиціонується від системи числового керування навколо координатних осей X, Y, а напрямний пристрій витратного матеріалу у вигляді металевого дроту містить систему незалежних приводів, які через сферичні шарніри і штанги постійної довжини зв'язані з окремими повзунами на напрямних приводах і через систему ЧПК задають орієнтацію витратного матеріалу співвісно отвору кільцевого катоду електронної гармати. Керованим обертанням електронної гармати відбувається утримання форми ванну розплаву в місцях подвійної кривизни поверхонь, що необхідно надрукувати, осадження витратного матеріалу під кутом до сусідніх шарів матеріалу тим самим забезпечуючи необхідні стратегії наплавлення. Система орієнтації напрямного пристрою 4 (рис. 4, б) витратного матеріалу складається з системи штанг постійної довжини 8, зв'язаних шарнірами 9 з декількома незалежними приводами лінійного руху Д1 і Д2 (може бути три і більше). Електронні промені розплавляючи розхідний матеріал у вигляді дроту 3 на підкладці 5 формують ванну розплаву і осаджують смуги металу пошарово накладаючи їх одна на одну у вигляді окремого шару 10 за рахунок переміщення підкладки 5 вниз по координаті Z і горизонтально уздовж координати X мехатронною системою лінійного переміщення. Конструктивно система приводів позиціонування напрямного пристрою 4 складається з двох і більше замкнених до напрямного пристрою 4 кінематичних ланцюга кожен від окремого серводвигуна Д1, Д2.

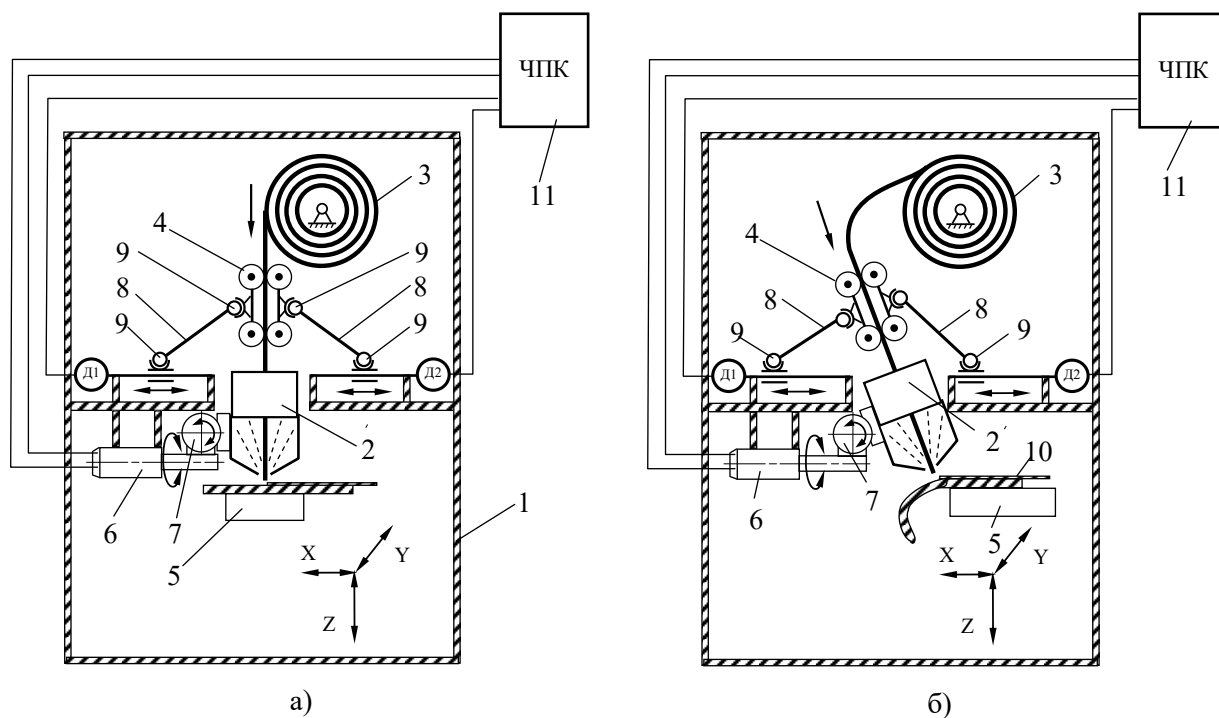


Рис. 4. Компоновальна схема обладнання для пошарового утворення металевих виробів з приводом обертання електронної гармати (а) та механізм орієнтації напрямного пристрою (б)

За допомогою одночасних обертальних рухів серводвигунів 6, 7, лінійних переміщень підкладки 5 уздовж координатних осей X, Y, Z, позиціюванні напрямного пристрою 4 співвісно отвору кільцевого катоду електронної гармати 2 в робочому просторі пристрою для тривимірного друку металевих виробів можливе підтримка і управління формою ванни розплаву, що переміщується по криволінійній поверхні 3D деталі, контроль температурних полів в місцях реверсу траєкторій в складних стратегіях осадження шарів металу.

Висновки

В результаті аналізу сучасної наукової і патентної інформації запропоновано компоновальні рішення програмно-керованого технологічного обладнання для виготовлення металевих тривимірних об'єктів, що дозволяють розширити технологічні можливості пристрою друку пошаровим осадженням металевого витратного матеріалу у вигляді дроту в бухтах та отримувати якісні тривимірні деталі з поверхнями подвійної кривизни. Основним резервом в цьому напрямку є технологічно керовані рухи орієнтації електронної гармати, позиціювання напрямного пристрою витратного матеріалу та лінійного переміщення підкладки із сформованими попередньо шарами металу, утримання форми ванни розплаву в зоні осадження на криволінійних поверхнях друкованих металевих виробів. Запропоновані пристрої для виготовлення металевих тривимірних об'єктів на відміну від існуючих стратегій формування великої товщини 3D-друкованої деталі накладанням кількох паралельних шарів з перекриттям зони наплавлення дозволяють за допомогою переорієнтації попередньо сформованого шару металу отримувати керовані умови нагрівання та кристалізації витратного матеріалу при осадженні.

Список використаної літератури

1. T. DebRoy et al., "Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 92, pp. 112–224, 2018, doi:10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
2. J. Allen, "An Investigation into the Comparative Costs of Additive Manufacture vs. Machine from Solid for Aero Engine Parts," *Proc. Meet. RTO-MP-AVT-139*, pp. 17-1-17–10, 2006, doi: 10.14339/RTO-MP-AVT-139-17.
3. Dmytro Kovalchuk, Vitalii Melnyk, Ihor Melnyk, Borys Tugai Prospects of Application of Gas-Discharge Electron Beam Guns in Additive Manufacturing // *Elektrotechnika & Elektronika (E+E)*. No. 5-6/2016, pp.36-42
4. Dmytro Kovalchuk, Vitalii Melnyk, Ihor Melnyk, Borys Tugai Advanced Technical and Technological Solutions for Additive Manufacturing by xBeam 3D Metal Printing // *Elektrotechnika & Elektronika (E+E)*, Vol.53, No 3-4 (2018) pp. 60-68.
5. Kovalchuk, D., Ivasishin O. Profile electron beam 3D metal printing // Elsevier Inc., Additive Manufacturing for the Aerospace Industry (Book Chapter), 19 February 2019, Pages 213-233 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00012-1>
6. Патент України № 143235, МПК B22D 19/00, B22D 19/10, B23K 26/34, C23C 26/02, Спосіб адитивного виробництва металевих 3D-виробів / Григоренко Г.М., Костін В.А., Григоренко С.Г., Шаповалов В.О., Ахонін С.В., Пікулін О.М., патентовласник Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, заявл. 10.12.2019, Бюл.№ 23, опубл. 27.07.2020, Бюл.№ 14
7. Патент України № 112682, МПК B22D19/00, B22D23/00, Спосіб виготовлення тривимірних об'єктів і пристрій для його реалізації / Ковальчук Д.В., Мельник В.Г., патентовласник Приватне акціонерне товариство "НВО "Червона хвиля", заявл. 10.03.2015, бюл. № 5/2015, опубл. 10.10.2016, бюл. № 19/2016
8. Kovalchuk D.; Melnyk V.; Melnyk I.; Savvakina D.; Dekhtyar O.; Stasiuk O.; Markovsky P Microstructure and Properties of Ti-6Al-4V Articles 3D-Printed with Co-axial Electron Beam and Wire Technology. // *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2021, 30(7), pp. 5307–5322 DOI: 10.1007/s11665-021-05770-9
9. A.E. Davis; J.R. Kennedy; D. Strong; D. Kovalchuk; S. Porter; P.B. Tailoring equiaxed β -grain structures in Ti-6Al-4V coaxial electron beam wire additive manufacturing // *Prangnell Materialia*, 2021, 20, 101202 DOI: 10.1016/j.mtla.2021.101202

References

1. DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De, A., & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components: Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112–224. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
2. Allen, J. (2006). An investigation into the comparative costs of additive manufacture vs. machine from solid for aero engine parts. In *Proceedings of RTO-MP-AVT-139* (pp. 17-1–17-10). NATO Research and Technology Organization. <https://doi.org/10.14339/RTO-MP-AVT-139-17>
3. Kovalchuk, D., Melnyk, V., Melnyk, I., & Tugai, B. (2016). Prospects of application of gas-discharge electron beam guns in additive manufacturing. *Elektrotechnika & Elektronika (E+E)*, 5–6, 36–42.
4. Kovalchuk, D., Melnyk, V., Melnyk, I., & Tugai, B. (2018). Advanced technical and technological solutions for additive manufacturing by xBeam 3D metal printing. *Elektrotechnika & Elektronika (E+E)*, 53(3–4), 60–68.

5. Kovalchuk, D., & Ivasishin, O. (2019). Profile electron beam 3D metal printing. In *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry* (pp. 213–233). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814062-8.00012-1>
6. Hryhorenko, H. M., Kostin, V. A., Hryhorenko, S. H., Shapovalov, V. O., Akhonin, S. V., & Pikulín, O. M. (2020). Sposib adytyvnoho vyrobnytstva metalevykh 3D-vyrobiv [Method of additive manufacturing of metallic 3D products] (Patent No. 143235). Institute of Electric Welding named after E. O. Paton, National Academy of Sciences of Ukraine.
7. Kovalchuk, D. V., & Melnyk, V. H. (2016). Sposib vyhotovlennia tryvymirnykh ob'iektiv i prystroi dlia yoho realizatsii [Method for manufacturing three-dimensional objects and device for its implementation] (Patent No. 112682). Private Joint Stock Company “NVO Chervona Khvyliia”.
8. Kovalchuk, D., Melnyk, V., Melnyk, I., Savvakín, D., Dekhtyar, O., Stasiuk, O., & Markovsky, P. (2021). Microstructure and properties of Ti-6Al-4V articles 3D-printed with co-axial electron beam and wire technology. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(7), 5307–5322. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05770-9>
9. Davis, A. E., Kennedy, J. R., Strong, D., Kovalchuk, D., Porter, S., & Prangnell, P. B. (2021). Tailoring equiaxed β -grain structures in Ti-6Al-4V coaxial electron beam wire additive manufacturing. *Materialia*, 20, 101202. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101202>

Дата першого надходження рукопису до видання: 15.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

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

РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЦЕХУ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА З ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛЮВАННЯ В MATLAB SIMULINK

У статті представлено результати впровадження сучасних інформаційних технологій моделювання в середовищі MATLAB Simulink для визначення величини струмів короткого замикання при розробці системи електропостачання промислового підприємства в освітньому процесі з підготовки фахівців першого (бакалаврського) рівня освіти зі спеціальності G3. Електрична інженерія (141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) в Херсонському національному технічному університеті.

На прикладі системи електропостачання зварювального цеху заводу важкого машинобудування показано, що дослідження коротких замикань в системі електропостачання цеху промислового підприємства є основним етапом розробки оптимальної електричної мережі.

В середовищі MATLAB Simulink проведено моделювання нормального режиму роботи системи електропостачання заводу та моделювання аварійних режимів короткого замикання, що призводить до підвищення струму в елементах мережі. Проведено порівняння результатів аналітичного розрахунку струмів короткого замикання в мережі до 1 кВ та моделювання в середовищі MATLAB Simulink. Отримані результати підтвердили коректність розрахунку із врахуванням припустимих наближень.

Дослідження показало, що використання MATLAB Simulink, в курсовому проєктуванні з освітньої компоненти «Електропостачання» дозволило здобувачам освіти знайти більш раціональні технічні розв'язання конкретних проблем при розробці оптимальної системи електропостачання, і відповідно підвищити якість виконання курсової роботи.

Зазначено, що використання елементів САПР та сучасних засобів моделювання 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.

Ключові слова: система електропостачання цеху промислового підприємства, розрахунок струмів короткого замикання, розрахункова схема короткого замикання, схема заміщення короткого замикання, комп'ютерне моделювання, середовище MATLAB Simulink, осцилограма перехідного процесу струму короткого замикання.

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. KORNIENKO

Student of the First (Bachelor's) Level of Higher Education
at the Department of Program Tools and Technologies

Kherson National Technical University

ORCID: 0009-0002-3145-4382

CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN THE POWER SUPPLY SYSTEM OF AN INDUSTRIAL ENTERPRISE WORKSHOP USING MATLAB SIMULINK MODELING

The article presents the results of the implementation of modern information technologies of modeling in the MATLAB Simulink environment to determine the magnitude of short-circuit currents when developing a power supply system of an industrial enterprise in the educational process of training specialists of the first (bachelor's) level of education in the specialty G3. Electrical Engineering (141. Electric Power, Electrical Engineering and Electromechanics) at the Kherson National Technical University.

Using the example of the power supply system of a welding shop of a heavy engineering plant, it is shown that the study of short circuits in the power supply system of a shop of an industrial enterprise is the main stage of developing an optimal electrical network.

In the MATLAB Simulink environment, the normal operation mode of the plant's power supply system and the simulation of emergency short-circuit modes, which lead to an increase in current in the network elements, were simulated. The results of the analytical calculation of short-circuit currents in the network up to 1 kV and the simulation in the MATLAB Simulink environment were compared. The obtained results confirmed the correctness of the calculation taking into account the permissible approximations.

The study showed that the use of MATLAB Simulink in course design for the educational component "Power Supply" allowed students to find more rational technical solutions to specific problems when developing an optimal power supply system, and accordingly improve the quality of course work.

It is noted that the use of CAD elements and modern modeling tools in the educational process when training specialists in the specialty G3. Electrical Engineering (141. Electric Power, Electrical Engineering and Electromechanics) improves the professional skills of students and increases competitiveness in the labor market.

Key words: power supply system of an industrial enterprise workshop, calculation of short-circuit currents, short-circuit calculation scheme, short-circuit equivalent scheme, computer modeling, MATLAB Simulink environment, oscillogram of the short-circuit current transient process.

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].

Дослідження коротких замикань в системі електропостачання промислового підприємства є основним етапом розробки оптимальної електричної мережі. Звичайно, такі дослідження проводяться з використанням сучасного комп'ютерного програмного забезпечення як моделюванням нормального режиму роботи системи, так і моделюванням можливих аварійних режимів, що призводить до підвищення струму в елементах мережі, і якщо не забезпечується надійний захист, може стати причиною пошкодження електроустаткування та подальшого розвитку аварії всієї енергосистеми [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Причиною більшості аварій в електроустановках є короткі замикання (КЗ), які виникають внаслідок порушення електричної міцності ізоляції струмопровідних частин. Протікання струму КЗ є короткочасним, тому призводить до короткочасного збільшення втрат електричної енергії в провідниках та контактах, що супроводжується їх сильним нагріванням. Перегрів струмопровідних частин може призвести до швидкого старіння та руйнування ізоляції, зварювання та вигорання контактів електричних апаратів, втрати механічної міцності шин та провідників. Провідники та комутаційні пристрої повинні витримувати нагрів струмами короткого замикання, тобто бути термічно стійкими [1].

Протікання струму КЗ також супроводжується значними електродинамічними зусиллями між провідниками. Струмопровідні частини, комутаційні апарати та електричні машини повинні бути сконструйовані таким чином, щоб вони витримували без пошкодження зусилля, які виникають при КЗ – вони повинні бути електродинамічно стійкими [1].

Отже, розрахунок струмів короткого замикання є первинним дослідженням при розробці надійної, оптимальної системи електропостачання промислового підприємства.

Відповідно, при розробці системи електропостачання є очевидною потреба у високоякісних інструментах для проектування, моделювання та оптимізації таких систем [1]. Одним із найзручніших програмних засобів структурного математичного моделювання на теперішній час є додаток Simulink пакета MATLAB фірми Mathwork [1- 3].

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є аналіз ефективності використання сучасних технологій моделювання в середовищі Matlab/Simulink для визначення величини струмів короткого замикання при розробці системи електропостачання промислового підприємства.

Викладення основного матеріалу дослідження

В Херсонському національному технічному університеті при підготовці здобувачів першого (бакалаврського) рівня освіти за спеціальністю Г3. 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 устаткованого обладнання (кількість, потужність та режими роботи електроприймачів цеху).

При розробці оптимальної системи електропостачання заводу важкого машинобудування визначено навантаження зварювального цеху методом впорядкованих діаграм; обґрунтовано вибір кількості та потужності цехових трансформаторів; розроблено розподільні мережі 10 кВ та 0,38 кВ.

Для розрахунку струмів короткого замикання в системі електропостачання зварювального цеху складено розрахункову схему короткого замикання (рис. 1) з наступними даними:

- два трансформатори ТП4 ТМ-1000-10/0,4 кВ; $S_{ном} = 1000 \text{ кВА}$;
- кабельна лінія ГЗП–ТП4 та кабельна лінія ТП4–СП2;
- лінія СП2–споживач ($P_n = 48 \text{ кВт}$; $\cos \varphi = 0,95$; $I_n = 76,8 \text{ А}$);
- автоматичні вимикачі SF1 (ВА-53-43, $I_n = 1600 \text{ А}$); SF21 (ВА-51-37, $I_n = 400 \text{ А}$); SF31 (ВА-51-33, $I_n = 160 \text{ А}$);

Для спрощення розрахунку прийнято, що в роботі знаходиться одна лінія ГЗП–ТП4 та один трансформатор ТП4. Розрахункові точки КЗ:

К1 – на шинах РУНН ТП4;

К2 – на шинах силового пункту СП2;

К3 – на шинах споживача.

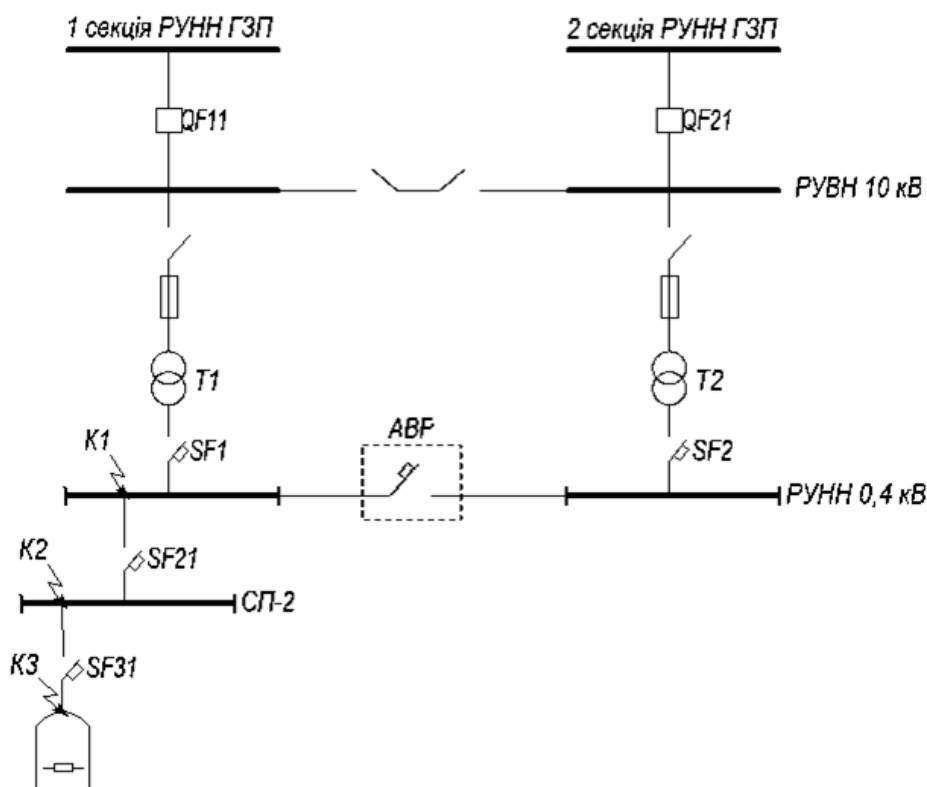


Рис. 1. Розрахункова схема короткого замикання

Результати розрахунку струмів КЗ в зазначених точках К1, К2 та К3 наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Зведена відомість струмів КЗ

Точка КЗ	R_k , мОм	X_k , мОм	Z_k , мОм	R_k/X_k	K_y	q	$I_k^{(3)}$, кА	i_y , кА	$I_{\infty}^{(3)}$, кА	$I_k^{(2)}$, кА
K1	17,86	8,62	19,83	2,07	1	1	11,64	16,46	11,64	10,1
K2	46,63	10,81	47,87	4,313	1	1	4,58	6,48	4,58	3,97
K3	50,53	11,85	51,9	4,264	1	1	4,227	5,98	4,227	3,67

Для аналізу коротких замикань у електричній мережі зварювального цеху проведено моделювання системи електропостачання заводу важкого машинобудування в середовищі MATLAB Simulink (рис. 2).

На рис. 3 наведено параметри блоку трансформатора ТМ-1000/10, застосовані в моделі.

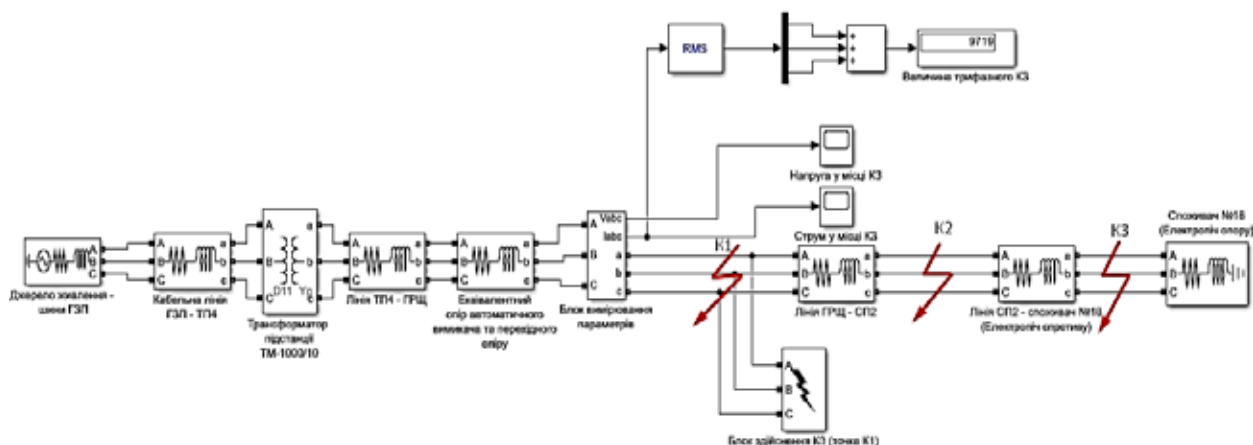


Рис. 2. Схема Simulink моделі для розрахунку короткого замикання в системі електропостачання заводу важкого машинобудування [3]

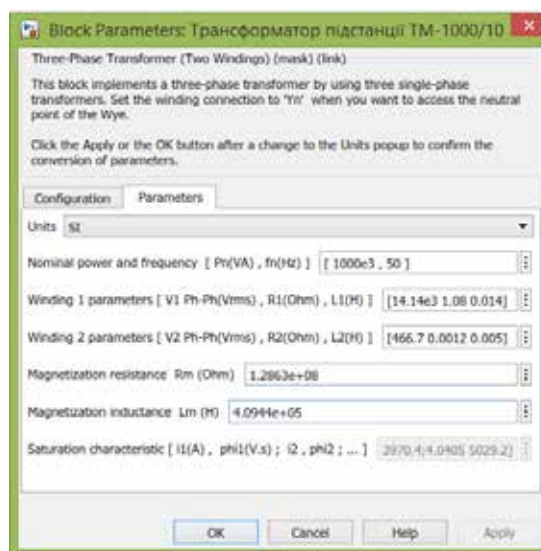


Рис. 3. Параметри блоку трансформатора ТМ-1000/10 [3]

З використанням моделювання в середовищі MATLAB Simulink проведено моделювання нормального режиму роботи системи електропостачання заводу та моделювання аварійних режимів короткого замикання, що призводить до підвищення струму в елементах мережі.

На рис. 4-6 наведено осцилограми перехідного процесу струмів та напруги при короткому замиканні.



Рис. 4. Осцилограма перехідного процесу струму в режимі КЗ у момент часу 0,04 с [3]

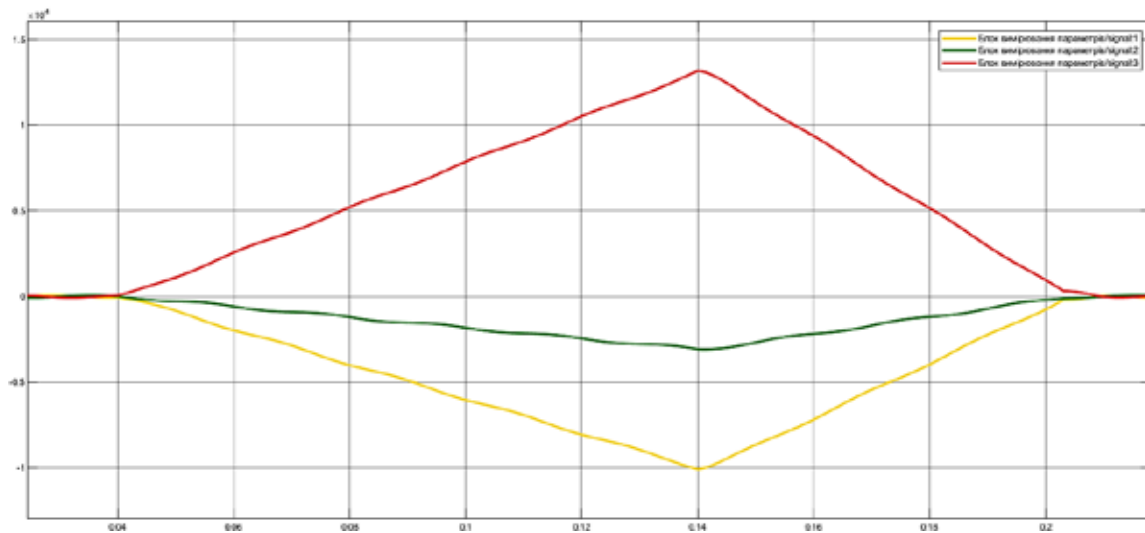


Рис. 5. Осцилограма перехідного процесу струмів трьох фаз при короткому замиканні у точці К1 [3]

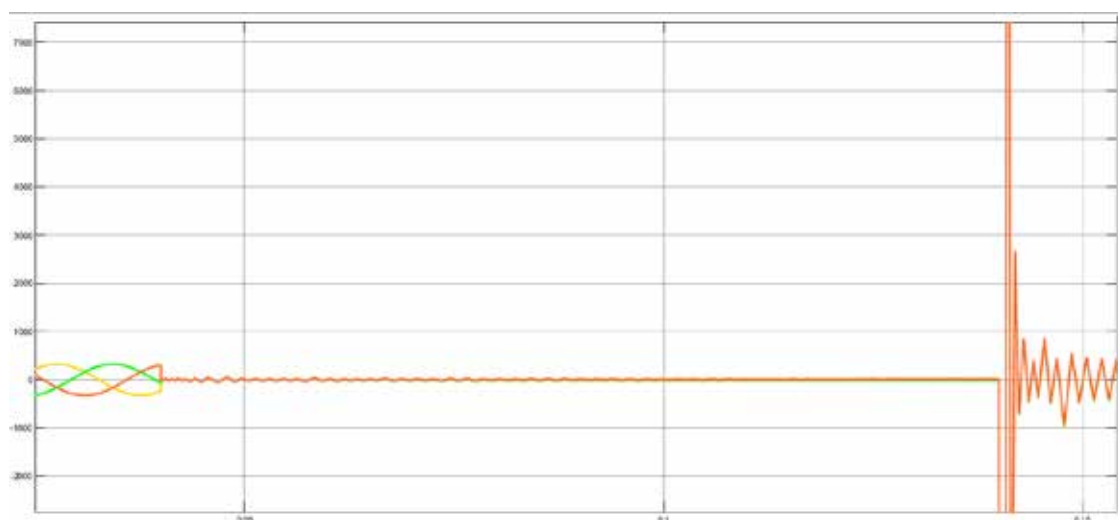


Рис. 6. Осцилограма перехідного процесу напруги в режимі КЗ [3]

З рис. 5 видно, що максимальне миттєве значення струму в початковий момент часу – в фазі С складає 13,2 кА. Значення ударного струму при аналітичному розрахунку дорівнює 16,81 кА. Напруга, як і слід було очікувати, при короткому замиканні практично дорівнює нулю.

В табл. 2 наведено результати розрахунку струмів короткого замикання в усіх зазначених точках КЗ мережі як аналітичним методом, так і з використанням моделювання в середовищі MATLAB Simulink.

Таблиця 2

Зведена таблиця струмів короткого замикання

Розрахункова точка	Аналітичний метод		Моделювання в MATLAB Simulink [3]	
	Періодичний струм трифазного КЗ, кА	Ударний струм, кА	Періодичний струм трифазного КЗ, кА	Ударний струм, кА
K1	11,64	16,46	9,719	13,2
K2	4,58	6,48	4,032	5,82
K3	4,227	5,98	3,573	5,12

Отримані результати свідчать про коректність розрахунку із врахуванням припущень, які покладались для спрощення розрахунків аналітичним методом.

Багаторічний досвід використання MATLAB Simulink в курсовому проектуванні з «Електропостачання» показав, що отримані результати моделювання дозволяють здобувачам освіти знайти більш раціональні технічні розв'язання конкретних проблем при розробці оптимальної системи електропостачання, і відповідно підвищити якість виконання курсової роботи.

Висновки

В роботі проведено аналіз ефективності використання сучасних технологій моделювання в середовищі MATLAB Simulink для визначення величини струмів короткого замикання при розробці системи електропостачання промислового підприємства.

В середовищі MATLAB Simulink проведено моделювання нормального режиму роботи системи електропостачання заводу та моделювання аварійних режимів короткого замикання, що призводить до підвищення струму в елементах мережі.

Проведено порівняння результатів аналітичного розрахунку струмів короткого замикання в мережі до 1 кВ та моделювання в середовищі MATLAB Simulink. Отримані результати підтвердили коректність розрахунку із врахуванням припустимих наближень.

Дослідження показало, що використання MATLAB Simulink, в курсовому проектуванні з освітньої компоненти «Електропостачання» дозволило здобувачам освіти знайти більш раціональні технічні розв'язання конкретних проблем при розробці оптимальної системи електропостачання, і відповідно підвищити якість виконання курсової роботи. З іншого боку, використання елементів САПР та сучасних засобів моделювання 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. Толочко О.І. Моделювання та аналіз електромеханічних систем в MATLAB: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 298 с.
2. Wolf Dieter Pietruszka. MATLAB und Simulink in der Ingenieurpraxis. Modellbildung, Berechnung und Simulation. Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag, 2006. 402 S.
3. Simscape Block Libraries / MathWorks [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html> (дата звернення: 24.10.25). Назва з екрана.

References

1. Tolochko, O.I. (2019) Modeling and Analysis of Electromechanical Systems in MATLAB: A Textbook. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 298 p.
2. Wolf Dieter Pietruszka. MATLAB und Simulink in der Ingenieurpraxis. Modellbildung, Berechnung und Simulation. Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag, 2006. 402 S.
3. Simscape Block Libraries / MathWorks [Electronic resource]. Access mode: <https://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ug/introducing-the-simscape-block-libraries.html> (last access: 24.10.25). Title from the screen.

Дата першого надходження рукопису до видання: 19.11.2025
 Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025
 Дата публікації: 31.12.2025

В. М. ДУБІК

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергозберігаючих технологій
та енергетичного менеджменту
Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
ORCID: 0000-0002-9743-1565

А. П. БЕРЕЗОВСЬКИЙ

кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри прикладної інженерії та охорони праці
Уманський національний університет
ORCID: 0000-0002-9526-3721

Е. В. ПРОКОПЕНКО

кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри прикладної інженерії та охорони праці
Уманський національний університет
ORCID: 0000-0003-4642-7635

РОЗРОБКА БІОСЕНСОРНИХ СИСТЕМ ДЛЯ РАННЬОЇ ДІАГНОСТИКИ ХРОНІЧНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ В УКРАЇНІ

Актуальність дослідження зумовлено потребою української системи охорони здоров'я в технологіях, здатних забезпечувати виявлення хронічних захворювань на доклінічних стадіях, коли біохімічні зміни є мінімальними, а традиційні лабораторні методи демонструють недостатню чутливість і затримку отримання результатів.

Мета статті полягає в науковому обґрунтуванні принципів проєктування та впровадження біосенсорних систем, здатних забезпечувати раннє виявлення хронічних захворювань в Україні і підвищувати результативність діагностичного процесу на різних рівнях медичної допомоги.

Методи дослідження передбачали аналітичне узагальнення сучасних технічних рішень біосенсорики, аналіз параметрів чутливості та стабільності сенсорних платформ, оцінювання передумов їх цифрової інтеграції в медичну інфраструктуру, а також структурно-функціональний розгляд перешкод розвитку в українських умовах.

Результати дослідження полягають у тому, що встановлено ключові технічні та біомедичні параметри, які визначають межі чутливості й точності біосенсорних систем; виявлено умови, за яких забезпечується їх ефективна інтеграція в первинну ланку, телемедичні сервіси й лабораторні процеси; доведено, що розвиток сенсорних технологій в Україні стримується нестачею високотехнологічних матеріалів, відсутністю адаптованих стандартів калібрування і фрагментарністю інноваційної інфраструктури. Сформовано рекомендації щодо проєктування модульних сенсорних платформ, удосконалення цифрової сумісності, впровадження поетапної клінічної апробації та розбудови сервісної підтримки.

Висновки свідчать, що біосенсорні системи є критично важливим інструментом для підвищення результативності ранньої діагностики, але їх широке застосування в Україні можливе лише за умови технологічної стандартизації, цифрової інтеграції та розвитку локальної матеріально-технічної бази.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням стійкіших рецепторних матеріалів, упровадженням алгоритмів інтелектуального оброблення сигналів, створенням національних стандартів валідації та формуванням повномасштабної виробничої інфраструктури біосенсорних технологій.

Ключові слова: біомаркери, сенсорні платформи, точна діагностика, point-of-care технології, біоаналітичні методи, наноструктуровані матеріали, клінічна валідація, телемедичний моніторинг, цифрова інтеграція, функціональна стабільність сенсорів.

V. M. DUBIK

PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Energy Saving Technologies
and Energy Management
Higher Educational Institution "Podillia State University"
ORCID: 0000-0002-9743-1565

A. P. BEREZOVSKIY

PhD of Agricultural Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Applied Engineering and Labor Safety
Uman National University
ORCID: 0000-0002-9526-3721

E. V. PROKOPENKO

PhD of Agricultural Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Applied Engineering
and Labor Protection
Uman National University
ORCID: 0000-0003-4642-7635

DEVELOPMENT OF BIOSENSOR SYSTEMS FOR EARLY DIAGNOSIS OF CHRONIC DISEASES IN UKRAINE

The relevance of this study is driven by the need within the Ukrainian healthcare system for technologies capable of detecting chronic diseases at preclinical stages, when biochemical changes are minimal and traditional laboratory methods show insufficient sensitivity and delayed result acquisition.

The purpose of the article is to provide a scientific rationale for the principles of designing and implementing biosensor systems that can enable early detection of chronic diseases in Ukraine and enhance the effectiveness of the diagnostic process across different levels of medical care.

The research methods included analytical generalization of current technical solutions in biosensing, analysis of sensitivity and stability parameters of sensor platforms, assessment of the prerequisites for their digital integration into the medical infrastructure, and a structural-functional examination of barriers to their development in Ukrainian conditions.

The results demonstrate that the key technical and biomedical parameters determining the sensitivity and accuracy limits of biosensor systems have been identified. The study reveals the conditions that ensure effective integration of these systems into primary care, telemedicine services, and laboratory workflows. It also shows that the development of sensor technologies in Ukraine is constrained by the shortage of high-tech materials, the absence of adapted calibration standards, and the fragmented nature of the innovation infrastructure. Recommendations have been formulated regarding the design of modular sensor platforms, improvement of digital compatibility, implementation of phased clinical testing, and expansion of service support.

The conclusions indicate that biosensor systems are a critically important tool for improving the effectiveness of early diagnosis, but their broad application in Ukraine is possible only with technological standardization, digital integration, and the development of a local material and technical base.

Future research should focus on developing more stable receptor materials, implementing advanced signal processing algorithms, establishing national validation standards, and creating a comprehensive manufacturing infrastructure for biosensor technologies.

Key words: biomarkers, sensor platforms, precision diagnostics, point-of-care technologies, bioanalytical methods, nanostructured materials, clinical validation, telemedicine monitoring, digital integration, functional sensor stability.

Постановка проблеми

Підвищення ефективності раннього виявлення хронічних захворювань в Україні безпосередньо залежить від здатності діагностичних систем фіксувати молекулярні та біохімічні зміни на доклінічних стадіях, проте наявні інструменти скринінгу залишаються не досить чутливими, повільними або економічно недоступними для широкого застосування. Це формує наукову проблему створення інтелектуальних біосенсорних платформ, здатних забезпечувати високу специфічність, швидкість аналізу та стабільність вимірювань, водночас залишаючись технологічно простими й придатними до масштабування. Практична частина проблеми зумовлена тим, що система охорони здоров'я потребує рішень, які можуть інтегруватися в первинну і спеціалізовану медичну допомогу, телемедичні сервіси та лабораторну інфраструктуру з мінімальними витратами на обслуговування. Додаткові виклики створює недостатня розвиненість вітчизняного ринку сенсорної електроніки, обмежені можливості стандартизації та нерівномірна доступність сучасних діагностичних технологій у регіонах. У таких умовах проблема набуває міждисциплінарного характеру, адже її розв'язання потребує одночасного врахування біомедичних, інженерних, матеріалознавчих та організаційно-інфраструктурних аспектів для формування надійних і доступних рішень ранньої діагностики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Огляд сучасних досліджень дає змогу виокремити чотири взаємопов'язані наукові напрями. Перший з них охоплює концептуалізацію сенсорних технологій та методологічних основ побудови біосенсорних платформ. Зокрема, у дослідженні М. Н. Хосайна (M. N. Hosain) та співавторів представлено IoT-орієнтовану архітектуру біосенсорів, що забезпечує безперервний моніторинг фізіологічних параметрів у реальному часі та підвищує

потенціал раннього виявлення хронічних патологій [1]. Принципи побудови діагностичних систем раннього виявлення узагальнює А. Нуріддін (A. Nuriddin), підкреслюючи важливість стандартизації сенсорних методик для забезпечення відтворюваності вимірювань [2]. Зі свого боку, Т. Васілевський (T. Wasilewski) та співавтори демонструють роль алгоритмів штучного інтелекту в підвищенні чутливості сенсорних модулів, зокрема у виявленні ключових біомаркерів, що характеризують перебіг хронічних захворювань [3]. Узагальнення цього напрямку засвідчує потребу подальшого розроблення сенсорних систем із функціями автономного аналізу та інтелектуальної інтерпретації сигналів, що дозволить підвищити точність і швидкість первинного скринінгу в українській медичній практиці.

Другий напрям досліджень охоплює матеріалознавчі та технічні рішення, спрямовані на підвищення селективності й стабільності сенсорних платформ. У роботі О. Коренівської (O. Korenivska) та співавторів описано застосування оптичних методів для точного вимірювання фізіологічних параметрів у телемедичних системах, що забезпечує високу чутливість під час роботи з дитячими пацієнтами [4]. Ефективність ферментного біосенсора для визначення рівнів аспартатамінотрансферази демонструють Д. Мруга (D. Mruga) та співавтори, обґрунтовуючи переваги точного контролю біохімічних показників [5]. Дослідники К. М. Дорошенко (K. M. Doroshenko) та О. І. Шефченко (O. I. Shefchenko) характеризують МХене-графенові нанокompозити як високоперспективні матеріали для створення сенсорів нового покоління з надвисокою роздільною здатністю [6]. Класифікацію сенсорних технологій узагальнюють М. Парк (M. Park) та Й. Дж. Хео (Y. J. Heo), підкреслюючи важливість властивостей матеріалів для тривалого та стабільного функціонування сенсорів у клінічних умовах [7]. У межах цього напрямку подальші дослідження мають бути зосереджені на створенні сенсорних матеріалів із керованими характеристиками та на їх адаптації до локальних умов роботи українських діагностичних лабораторій.

Третій науковий напрям пов'язаний з розробленням біосенсорів для виявлення специфічних біомаркерів хронічних патологій, що дозволяють здійснювати мультиплексні та високоточні аналізи. Зокрема, у дослідженні І. Бадільйо-Рамірес (I. Badillo-Ramírez) та співавторів доведено ефективність графенових біосенсорів для визначення маркерів хронічних запальних процесів, що формує підґрунтя для високочутливих діагностичних платформ [8]. Можливості швидкої багатоканальної діагностики за допомогою сенсорів, здатних аналізувати кілька біомаркерів одночасно, досліджують Р. А. Сукумаран (R. A. Sukumaran) та співавтори [9]. Перспективність застосування біосенсорів для детекції галектинів як універсальних індикаторів хронічних захворювань обґрунтовано в роботі Д. Капассо (D. Capasso) та співавторів [10]. Функціональні можливості сенсорних технологій у медичній діагностиці систематизують А. Халім (A. Haleem) з колегами, при цьому визначають їхню роль у створенні швидких і точних систем раннього виявлення [11]. Подальші дослідження в межах цього напрямку мають бути спрямовані на створення мультибіомаркерних платформ, здатних забезпечити комплексне оцінювання стану пацієнта під час раннього скринінгу хронічних патологій.

Четвертий напрям наукових праць охоплює інтелектуальні, електрохімічні та комбіновані рішення, що забезпечують автоматизацію процесів виявлення патологічних змін і підвищення точності діагнозу. Наприклад, можливість застосування біосенсорних технологій у діагностиці аутоімунних хронічних захворювань демонструють Р. Голфінопулу (R. Golfinooulou) та С. Кінтізіос (S. Kintzios), підкреслюючи складність аналізу біологічних середовищ і необхідність високої селективності сенсорів [12]. Зі свого боку, Дж. Х. Кім (J. H. Kim) та співавтори аналізують технологічні інновації у сфері електрохімічних сенсорів, що включають мініатюризацію, покращення стабільності електродів та розширення функціональних можливостей портативних діагностичних пристроїв [13]. Узагальнення цього напрямку підтверджує, що перспективні дослідження мають бути спрямовані на створення інтелектуальних сенсорних комплексів, здатних інтегрувати великі масиви даних, автоматично їх інтерпретувати та забезпечувати високоточний скринінг на доклінічних стадіях.

Не досить дослідженими залишаються питання стабільності й точності біосенсорів у реальних клінічних умовах, оскільки більшість експериментів виконано в лабораторному середовищі, при цьому не враховано варіабельність біоматеріалу. Не розкрито механізми деградації біорецепторів та вплив біологічної матриці на межу виявлення. Бракує стандартизованих протоколів калібрування й клінічної валідації, що унеможлиблює порівнюваність результатів між платформами. Не розглянуто інтеграцію сенсорних систем у цифрову медичну інфраструктуру, а також відсутні комплексні дослідження, які враховують умови української медичної, виробничої та регуляторної екосистеми.

У запропонованій роботі узагальнено принципи функціонування біосенсорів та визначено ключові технічні й біомедичні параметри, що впливають на їх роботу в клінічних умовах. Обґрунтовано вимоги до цифрової та організаційної інтеграції сенсорів у первинну ланку, лабораторні процеси й телемедичні сервіси. Запропоновано рекомендації щодо проєктування, калібрування та апробації сенсорних платформ, здатних забезпечити достовірні результати в українських умовах. Дослідження формує наукове підґрунтя для подолання виявлених прогалин і створює передумови для розвитку національних технологій ранньої діагностики.

Формулювання мети статті

Мета статті полягає у формуванні науково обґрунтованого підходу до створення та впровадження біосенсорних систем, здатних забезпечувати раннє виявлення хронічних захворювань в Україні та підвищувати ефективність діагностичного процесу на різних рівнях медичної допомоги.

Завдання статті:

- 1) схарактеризувати принципи роботи сучасних біосенсорних технологій та визначити технічні й біомедичні параметри, що формують їх діагностичну ефективність;
- 2) обґрунтувати умови інтеграції біосенсорних платформ у медичну практику та виявити науково-технічні й організаційні перешкоди їх розвитку в Україні;
- 3) сформуванати науково обґрунтовані рекомендації щодо проєктування, апробації та впровадження біосенсорних рішень для ранньої діагностики хронічних захворювань.

Викладення основного матеріалу дослідження

Сучасні біосенсорні технології ґрунтуються на здатності функціональних матеріалів, біологічних елементів та аналітичних перетворювачів вибірково реагувати на специфічні біомаркери, що відображають ранні стадії патологічних процесів. Їхня діагностична цінність зумовлена комбінацією високої чутливості, швидкого отримання сигналу та можливості використання мінімальних обсягів біологічних зразків, що особливо важливо для хронічних захворювань, які на початкових етапах характеризуються низькою концентрацією маркерів у крові, слині чи міжклітинній рідині. Ефективність роботи таких систем визначається узгодженою взаємодією трьох базових компонентів: біорецепторів, які забезпечують специфічне зв'язування цільових молекул; фізико-хімічних перетворювачів, що трансформують біохімічну взаємодію в електричний, оптичний чи мас-спектрометричний сигнал; аналітичних модулів оброблення, здатних перетворювати первинний сигнал на клінічно релевантні показники. Саме завдяки цій архітектурі біосенсиори забезпечують раннє виявлення патологічних змін, оскільки реагують не на прояв хвороби, а на її молекулярні детермінанти (табл. 1).

Таблиця 1

Основні компоненти та функції сучасних біосенсорних систем

Компонент	Функціональне призначення	Діагностичний результат
Біорецептор (антитіла, ДНК-зонди, ферменти)	Вибіркове розпізнавання цільових біомаркерів	Забезпечення специфічності та мінімізація хибних реакцій
Перетворювач (електрохімічний, оптичний, п'єзоелектричний)	Перетворення біохімічної взаємодії у вимірювальний сигнал	Отримання кількісних параметрів аналізу
Аналітичний модуль оброблення	Фільтрація, калібрування та інтерпретація сигналів	Формування клінічно значущих показників
Платформа збирання зразків	Забезпечення стабільних умов вимірювання	Зниження похибки та шумів у результатах
Комунікаційні модулі	Передавання даних до медичних систем	Інтеграція в телемедицину та електронні протоколи

Джерело: сформовано на основі [7, р. 2; 3; 11; 13, р. 310].

Електрохімічні платформи залишаються найбільш адаптованими для швидких клінічних вимірювань, оскільки забезпечують точне визначення концентрацій ключових маркерів у мінімальному об'ємі зразка. На практиці вони використовуються в мобільних пунктах первинної допомоги для моніторингу глюкози, С-реактивного білка чи ліпідних показників, що дозволяє виявляти ранні запальні та метаболічні зрушення ще до розвитку вираженої симптоматики. Оптичні біосенсиори, зокрема на основі поверхневого плазмонного резонансу, забезпечують можливість безміткового аналізу і застосовуються для реєстрації низькоконцентраційних онкомаркерів або мікроРНК, що критично для раннього виявлення онкологічних захворювань [7, р. 3]. Саме до цього класу належить українська двоканальна SPR-платформа, розроблена для високочутливого моніторингу рецидивів гліом, яка працює шляхом фіксації змін у резонансному відгуку під час зв'язування пухлинних біомолекул і вже продемонструвала потенціал у післяопераційному нагляді [14, р. 502]. Біоімпедансні технології в умовах клінічної практики використовуються для оцінювання клітинних змін за аутоімунних або ендокринних порушень, оскільки здатні фіксувати функціональні зрушення мембран та міжклітинної взаємодії ще до появи лабораторно значущих відхилень. Платформи на основі наноматеріалів завдяки графеновим і нанопровідниковим структурам забезпечують ультрочутливу фіксацію мутацій або білкових маркерів на рівні одиничних молекул, що дозволяє проводити скринінг ризику онкопатологій або ускладнень хронічних захворювань на максимально ранніх етапах. У комплексі такі системи розширюють можливості клінічної діагностики – від регулярного домашнього моніторингу до застосування у спеціалізованих відділеннях онкології та нейрохірургії, формуючи багаторівневу інфраструктуру раннього виявлення патологічних змін.

Технічні та біомедичні параметри визначають ефективність роботи біосенсорних систем, оскільки саме вони формують межі чутливості, точності й відтворюваності результатів під час аналізу клінічно важливих біомаркерів.

Взаємодія між фізичними властивостями сенсорної платформи, характеристиками біорецепторів і специфікою біоматеріалу зумовлює ступінь сигналу, стабільність його реєстрації та можливість отримання достовірних даних на ранніх етапах патологічного процесу. Зокрема, якість іммобілізації рецепторів, електрохімічні й оптичні параметри поверхні, температура і склад біологічного середовища, а також рівень перешкод від неспецифічних взаємодій суттєво впливають на аналітичні можливості сенсорів [13, р. 310]. Оптимізація цих факторів є критичною для ранньої діагностики, оскільки концентрації ранніх маркерів зазвичай знаходяться на межі виявлення, а будь-які коливання умов можуть знизити точність інтерпретації.

Технічні та біомедичні параметри визначають межі аналітичних можливостей біосенсорних систем, оскільки саме вони формують інтенсивність сигналу, стабільність його реєстрації та здатність точно вимірювати низькі концентрації клінічно значущих маркерів. Якість рецепторних шарів, властивості сенсорної поверхні, умови біологічного середовища та рівень електронної стабільності безпосередньо впливають на точність і відтворюваність результатів, що є критично важливим для ранньої діагностики (табл. 2).

Таблиця 2

Ключові технічні та біомедичні параметри, що впливають на чутливість і точність біосенсорних систем

Параметр	Сутність впливу	Результат для діагностики
Якість іммобілізації біорецепторів	Стабільність зв'язування та збереження активності	Підвищення специфічності, зменшення хибних сигналів
Матеріал і наноструктура поверхні	Провідність, оптичні властивості, топографія	Підсилення сигналу, зниження межі виявлення
Температура та pH середовища	Оптимальні умови для реакцій біомолекул	Відтворюваність і стабільність вимірювань
Неспецифічні взаємодії	Вплив домішок і білкових фонових реакцій	Зменшення шумів та покращення точності
Електронна стабільність і калібрування	Лінійність і компенсація дрейфу	Достовірність кількісних результатів
Стан біоматеріалу	Якість, чистота, в'язкість зразка	Зменшення аналітичних похибок
Алгоритми оброблення сигналу	Фільтрація, нормалізація, цифрове підсилення	Точна інтерпретація концентрацій маркерів

Джерело: сформовано на основі [5, р. 724–725; 6, р. 12; 8, р. 2; 13, р. 315].

У практичному застосуванні кожен параметр, наведений у таблиці, визначає здатність біосенсорної системи працювати стабільно й достовірно в умовах реального біологічного середовища. Активність біорецепторів безпосередньо впливає на межу виявлення: деградація ферменту або антитіла знижує константу зв'язування й робить сенсор нечутливим до ранніх концентрацій маркерів, що характерно для початкових стадій хронічних патологій. Матеріал і наноструктура поверхні визначають рівень підсилення сигналу, адже нанотекстуровані електроди або оптичні підкладки забезпечують вищу площу взаємодії та зменшують фон, що дає змогу отримувати відгуки на рівні наномольних концентрацій. Температура, pH і чистота зразка впливають на кінетику реакцій і стабільність резонансних відгуків, тому неконтрольовані зміни цих параметрів часто призводять до дрейфу базової лінії або хибнопозитивних сигналів [5, р. 724]. Електронна стабільність трансд'юсера визначає лінійність і відтворюваність – критично важливі властивості для кількісного моніторингу, особливо в портативних клінічних пристроях.

Реальним українським прикладом ефективності правильно налаштованих параметрів є ферментативний біосенсор для визначення креатиніну [15, р. 18]. У цій системі оптимізована іммобілізація ферменту та контроль інтерференційних впливів матриці дозволили досягти високої точності в роботі з нефрологічними маркерами в низьких концентраціях без складної лабораторної підготовки, що демонструє практичну придатність таких сенсорів у ранній діагностиці порушень функції нирок. Таким чином, взаємодія технічних та біомедичних параметрів визначає не лише фізичні характеристики сигналу, а й реальний клінічний потенціал біосенсорних платформ у системі раннього виявлення хронічних захворювань.

Інтеграція біосенсорних платформ у сучасну медичну практику потребує узгодження технологічних, організаційних та клінічних умов, які забезпечують їх сумісність із діагностичними маршрутами пацієнтів, інфраструктурою первинної ланки та цифровими системами охорони здоров'я. На відміну від традиційних лабораторних методів, біосенсорні технології орієнтовані на оперативний аналіз, мінімальну підготовку зразків та можливість отримання результатів у місці надання медичної допомоги. Тому їх ефективне впровадження вимагає відповідної логістики зразків, стандартизації інтерфейсів передачі даних, надійної системи калібрування, а також адаптації робочих протоколів медичного персоналу. Важливими є також передумови цифрової сумісності: інтеграція сенсорів із телемедичними платформами, електронними медичними картками та системами автоматизованого моніторингу хронічних станів (табл. 3).

Ці умови визначають, наскільки технологія здатна працювати в реальному клінічному середовищі. На первинній ланці ключовими стають мінімальні вимоги до підготовки зразка, швидкість отримання результатів і сумісність із медичними інформаційними системами. У телемедичних сервісах основну роль відіграє автоматична передача та оброблення даних, що дозволяє лікарю отримувати динаміку показників без очного візиту. У лабораторних

процесах пріоритетом є стандартизоване калібрування і відтворюваність вимірювань, що забезпечує сумісність біосенсорних результатів із референтними методами. Реальним прикладом інтеграції в Україні є використання у Львові плястерного біосенсорного пристрою MAWI Biosensor Patch для добового холтер-моніторингу: сенсор реєструє ЕКГ протягом 24–72 годин, передає дані на хмарну платформу, де автоматичні алгоритми аналізують ритм і формують звіт для дистанційної консультації кардіолога [16]. Така модель демонструє, що за умов цифрової сумісності, стандартизованого протоколу та доступної логістики біосенсорні платформи можуть бути повноцінно інтегровані в українську клінічну практику.

Таблиця 3

Ключові умови та передумови інтеграції біосенсорних платформ у медичну практику

Умова / передумова	Характеристика	Значення для інтеграції
Стандартизовані клінічні протоколи	Визначені вимоги до використання сенсорів у маршруті пацієнта	Забезпечення відтворюваності та юридичної коректності
Сумісність із цифровими системами	Обмін даними з ЕМК, телемедичними сервісами, PHR	Можливість дистанційного моніторингу та автоматизації
Логістика роботи з біоматеріалом	Мінімальні вимоги до підготовки, стабільність зразків	Доступність для первинної ланки та мобільних бригад
Калібрування та технічне обслуговування	Регулярна перевірка чутливості, контроль дрейфу	Гарантія точності під час тривалого використання
Підготовка персоналу	Навчання медсестер та сімейних лікарів	Правильне застосування та інтерпретація результатів
Регуляторні вимоги	Сертифікація, відповідність медичним стандартам	Легальне впровадження в клінічну практику
Фінансова та інфраструктурна готовність	Можливість закупівель, підключення до мереж, технічна підтримка	Масштабованість і доступність у регіонах

Джерело: сформовано на основі [1; 2, р. 12; 9, р. 316–318; 16].

Розвиток біосенсорних систем в Україні стримується низкою взаємопов'язаних науково-технічних, стандартизаційних та організаційних проблем, що охоплюють увесь цикл – від фундаментальних досліджень до промислового виробництва й клінічного впровадження. Науково-технічні труднощі пов'язані з обмеженим доступом до високочистих матеріалів, наноструктурованих підкладок та сучасних методів мікрофабрикації, що знижує відтворюваність сенсорних характеристик і ускладнює масштабування прототипів [5, р. 724–726]. Значною проблемою є нестача обладнання для контрольованої іммобілізації біорецепторів і відсутність стабільних ланцюгів постачання ферментів, антитіл та нуклеїнових зондів, що створює високу варіабельність параметрів сенсорів між партіями. Додаткове обмеження становить недостатній рівень кваліфікації у сфері міждисциплінарної інженерії, зокрема в галузях біоелектроніки, аналітичної хімії та мікросистемної техніки, що ускладнює формування повноцінних команд розробників. Стандартизаційні проблеми проявляються у відсутності національних протоколів калібрування, тестування та валідації біосенсорів для медичного застосування. Чинні нормативи в Україні здебільшого орієнтовані на традиційне лабораторне обладнання, а не на портативні або point-of-care системи, що не дозволяє швидко проходити сертифікацію та впроваджувати нові технології. Нестача референтних біоматеріалів та контрольних панелей для перевірки точності ще більше ускладнює незалежне оцінювання якості. Важливою проблемою є слабка інтеграція сенсорних платформ із цифровими стандартами охорони здоров'я, що створює труднощі для включення даних в електронні медичні системи й телемедичні модулі [13, р. 310–312]. Організаційні виклики пов'язані з фрагментарністю інноваційної екосистеми: більшість розробок зосереджені в академічних лабораторіях, де обмежені можливості масштабного виробництва, довгострокового тестування та клінічних випробувань. Недостатність інвестицій та відсутність стабільних державних програм підтримки сенсорної інженерії знижують темпи переходу від прототипів до серійних виробів. У медичних закладах спостерігається низький рівень готовності до впровадження нових технологій через недостатнє навчання персоналу, нерівномірний доступ до сучасної інфраструктури та обмежені бюджети закупівель [9, р. 316–318]. Усе це формує стійкий розрив між потенціалом українських наукових розробок та їх реальним використанням у клінічній практиці, уповільнюючи створення повноцінного ринку біосенсорних технологій.

Розроблення рекомендацій щодо проектування, апробації та впровадження біосенсорних рішень для ранньої діагностики хронічних захворювань потребує цілісного поєднання інженерних, клінічних та організаційних підходів. На етапі проектування доцільно орієнтуватися на клінічно валідовані біомаркери та типові біоматеріали первинної ланки (капілярна кров, слина, сеча), забезпечуючи високу аналітичну чутливість у діапазоні концентрацій, характерному саме для доклінічних або ранніх стадій патології. Конструкція сенсора має бути модульною, придатною до масштабування, з мінімізованою потребою в підготовці зразка та з інтегрованими засобами самокалібрування, що зменшує залежність результату від користувача та умов експлуатації. Особлива увага має приділятися сумісності

з цифровою інфраструктурою охорони здоров'я, включно з можливістю автоматизованої передачі результатів у медичні інформаційні системи та телемедичні платформи з дотриманням вимог безпеки даних.

Апробація біосенсорних рішень повинна базуватися на поетапній клінічній валідації: спочатку в контрольованих лабораторних умовах із порівнянням із референтними методами, а далі – у пілотних проєктах на рівні сімейних лікарів і профільних амбулаторій з оцінюванням не лише аналітичних характеристик, а й впливу на клінічні маршрути, швидкість виявлення захворювань та економічну доцільність.

Практичне впровадження потребує адаптації протоколів використання біосенсорів до національних стандартів лабораторної та клінічної практики, розроблення навчальних програм для медичного персоналу та механізмів сервісного супроводу, що гарантують стабільність показників у реальних умовах. Систематичне поєднання техніко-технологічної оптимізації з клінічним та організаційним оцінюванням дає змогу перетворити біосенсорні платформи з експериментальних прототипів на інструменти рутинної ранньої діагностики хронічних захворювань в українській системі охорони здоров'я.

Висновки

Проведене дослідження показало, що біосенсорні системи мають високий потенціал для раннього виявлення хронічних захворювань завдяки здатності фіксувати мінімальні біохімічні зміни на доклінічних етапах. Установлено, що ефективність таких платформ визначається якістю рецепторних шарів, властивостями сенсорних поверхонь, стабільністю перетворювачів та контрольованістю параметрів біологічного середовища, що формує жорсткі вимоги до їх конструювання та тестування. З'ясовано, що інтеграція біосенсорів у первинну ланку, лабораторні процеси та телемедичні сервіси потребує стандартизованих протоколів, цифрової сумісності та належної підготовки медичного персоналу, оскільки саме ці умови забезпечують клінічну застосовність і оперативність діагностичних рішень. Ідентифіковано ключові проблеми у сфері сенсорних систем: недостатність високотехнологічних матеріалів і мікрофабрикаційних технологій, відсутність національних стандартів калібрування та валідації біосенсорів, слабка інтеграція зі структурою електронної охорони здоров'я та фрагментарність інноваційної інфраструктури. Ці чинники гальмують перехід від лабораторних прототипів до серійних клінічних рішень. Рекомендації дослідження передбачають спрямування зусиль на створення модульних сенсорних конструкцій з високою стабільністю, удосконалення алгоритмів аналізу сигналу, проведення поетапної клінічної апробації та формування інституційної бази для стандартизації й сервісного супроводу. Перспективи подальших досліджень полягають у розробленні нових біорецепторних матеріалів, упровадженні інтелектуальних методів інтерпретації даних та створенні національної системи валідації біосенсорних технологій.

Список використаної літератури

1. Hosain M. N., Kwak Y. S., Lee J., Choi H., Park J., Kim J. IoT-enabled biosensors for real-time monitoring and early detection of chronic diseases. *Physical Activity and Nutrition*. 2024. Vol. 28, № 4. Article 60. DOI: <https://doi.org/10.20463/pan.2024.0033>.
2. Nuriddin A. Diagnostic systems for early detection of diseases. *Western European Journal of Modern Experiments and Scientific Methods*. 2025. Vol. 3, № 3. P. 10–14. URL: <https://westerneuropenstudies.com/index.php/1/article/view/2158/1482> (дата звернення: 17.11.2025).
3. Wasilewski T., Kamysz W., Gębicki J. AI-assisted detection of biomarkers by sensors and biosensors for early diagnosis and monitoring. *Biosensors*. 2024. Vol. 14, № 7. Article 356. DOI: <https://doi.org/10.3390/bios14070356>.
4. Korenivska O., Benedytskyi V., Nikitchuk T., Kobylanskyi O. V., Zilgarayeva A., Volosovych O., Wójcik W. Application of optical methods for measuring physiological parameters in the construction of telemedicine systems for the diagnosis of infants and children. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments* 2024. 2024. Vol. 13400. P. 123–130. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.3058675>.
5. Mruga D., Dzyadevych S., Soldatkin O. Development and optimisation of the biosensor for aspartate aminotransferase blood level determination. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*. 2025. Vol. 417. P. 721–731. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00216-024-05682-2>.
6. Mykhailivna Doroshenko K., Shefchenko O. I. Graphene-based MXene nanocomposites for highly sensitive and selective detection of diverse analytes. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*. 2025. P. 1–30. DOI: <https://doi.org/10.1080/1536383X.2025.2553699>.
7. Park M., Heo Y. J. Biosensing technologies for chronic diseases. *BioChip Journal*. 2021. Vol. 15. P. 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13206-021-00014-3>.
8. Badillo-Ramírez I., Carreón Y. J., Rodríguez-Almazán C., Medina-Durán C. M., Islas S. R., Saniger J. M. Graphene-based biosensors for molecular chronic inflammatory disease biomarker detection. *Biosensors*. 2022. Vol. 12, № 4. Article 244. DOI: <https://doi.org/10.3390/bios12040244>.
9. Sukumaran R. A., Rahul P. K., Panicker L. R., Lakavath K., Kotagiri Y. G. Biosensors for rapid and early detection of chronic diseases. In: Mahato K., Chandra P. (eds). *Biosensors for Personalized Healthcare*. Springer, Singapore, 2024. P. 315–337 DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-5473-1_11.

10. Capasso D., Pirone L., Di Gaetano S., Russo R., Saviano M., Frisulli V., Scognamiglio V. Galectins detection for the diagnosis of chronic diseases: an emerging biosensor approach. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2023. Vol. 159. Article 116952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.116952>.
11. Haleem A., Javaid M., Singh R. P., Suman R., Rab S. Biosensors applications in medical field: a brief review. *Sensors International*. 2021. Vol. 2. Article 100100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100100>.
12. Golfinopoulou R., Kintzios S. Biosensing for autoimmune chronic disease – a review. *Chemosensors*. 2023. Vol. 11, № 7. Article 366. DOI: <https://doi.org/10.3390/chemosensors11070366>.
13. Kim J. H., Suh Y. J., Park D., Yim H., Kim H., Kim H. J., Hwang K. S. Technological advances in electrochemical biosensors for the detection of disease biomarkers. *Biomedical Engineering Letters*. 2021. Vol. 11, № 4. P. 309–334. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13534-021-00204-w>.
14. Samoylov A., Khristosenko R., Gridina N., Dorozinsky G., Romanchuk V., Khomenkova L. Dual-channel SPR biosensor for enhanced glioma relapse diagnostics: Blood cell aggregation as a biomarker for tumor malignancy. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. 2024. Vol. 27, № 4. P. 502–508. DOI: <https://doi.org/10.15407/spqeo27.04.502>.
15. Bakhmat V. A., Soldatkin O. O., Arkhypova V. M., Dzyadevych S. V. Development of creatinine-sensitive biosensor based on immobilized creatinine deiminase. *Biotechnologia Acta*. 2024. Vol. 17, № 2. P. 18–20. DOI: <https://doi.org/10.15407/biotech17.02.018>.
16. Бездротове Холтер-моніторування ЕКГ МАWI. Медичний центр Святої Параскеви: вебсайт. 2025. URL: <https://medcenter.lviv.ua/konsultaciya-kardiologa/bezdrotove-holter-monitoruvannya-mawi/>

References

1. Hosain, M. N., Kwak, Y. S., Lee, J., Choi, H., Park, J., & Kim, J. (2024). IoT-enabled biosensors for real-time monitoring and early detection of chronic diseases. *Physical Activity and Nutrition*, 28(4), Article 60. DOI: <https://doi.org/10.20463/pan.2024.0033>.
2. Nuriddin, A. (2025). Diagnostic systems for early detection of diseases. *Western European Journal of Modern Experiments and Scientific Methods*, 3(3), 10–14. URL: <https://westerneuropianstudies.com/index.php/1/article/view/2158/1482> (дата звернення: 17.11.2025).
3. Wasilewski, T., Kamysz, W., & Gębicki, J. (2024). AI-assisted detection of biomarkers by sensors and biosensors for early diagnosis and monitoring. *Biosensors*, 14(7), 356. DOI: <https://doi.org/10.3390/bios14070356>.
4. Korenivska, O., Benedytskyi, V., Nikitchuk, T., Kobylanskyi, O. V., Zilgarayeva, A., Volosovych, O., & Wójcik, W. (2024). Application of optical methods for measuring physiological parameters in the construction of telemedicine systems for the diagnosis of infants and children. *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2024*, 13400, 123–130. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.3058675>.
5. Mruga, D., Dzyadevych, S., & Soldatkin, O. (2025). Development and optimisation of the biosensor for aspartate aminotransferase blood level determination. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 417, 721–731. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00216-024-05682-2>.
6. Mykhailivna Doroshenko, K., & Shefchenko, O. I. (2025). Graphene-based MXene nanocomposites for highly sensitive and selective detection of diverse analytes. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 1–30. DOI: <https://doi.org/10.1080/1536383X.2025.2553699>.
7. Park, M., & Heo, Y. J. (2021). Biosensing technologies for chronic diseases. *BioChip Journal*, 15, 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13206-021-00014-3>.
8. Badillo-Ramírez, I., Carreón, Y. J., Rodríguez-Almazán, C., Medina-Durán, C. M., Islas, S. R., & Saniger, J. M. (2022). Graphene-based biosensors for molecular chronic inflammatory disease biomarker detection. *Biosensors*, 12(4), Article 244. DOI: <https://doi.org/10.3390/bios12040244>.
9. Sukumaran, R. A., Rahul, P. K., Panicker, L. R., Lakavath, K., & Kotagiri, Y. G. (2024). Biosensors for rapid and early detection of chronic diseases. In Mahato, K., & Chandra, P. (Eds.), *Biosensors for Personalized Healthcare* (pp. 315–337). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-97-5473-1_11.
10. Capasso, D., Pirone, L., Di Gaetano, S., Russo, R., Saviano, M., Frisulli, V., & Scognamiglio, V. (2023). Galectins detection for the diagnosis of chronic diseases: an emerging biosensor approach. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 159, Article 116952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.116952>.
11. Haleem, A., Javaid, M., Singh, R. P., Suman, R., & Rab, S. (2021). Biosensors applications in medical field: A brief review. *Sensors International*, 2, Article 100100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100100>.
12. Golfinopoulou, R., & Kintzios, S. (2023). Biosensing for autoimmune chronic disease – a review. *Chemosensors*, 11(7), Article 366. DOI: <https://doi.org/10.3390/chemosensors11070366>.
13. Kim, J. H., Suh, Y. J., Park, D., Yim, H., Kim, H., Kim, H. J., & Hwang, K. S. (2021). Technological advances in electrochemical biosensors for the detection of disease biomarkers. *Biomedical Engineering Letters*, 11(4), 309–334. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13534-021-00204-w>.

14. Samoylov, A., Khristosenko, R., Gridina, N., Dorozinsky, G., Romanchuk, V., & Khomenkova, L. (2024). Dual-channel SPR biosensor for enhanced glioma relapse diagnostics: Blood cell aggregation as a biomarker for tumor malignancy. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 27(4), 502–508. DOI: <https://doi.org/10.15407/spqeo27.04.502>.
15. Bakhmat, V. A., Soldatkin, O. O., Arkhypova, V. M., & Dzyadevych, S. V. (2024). Development of creatinine-sensitive biosensor based on immobilized creatinine deiminase. *Biotechnologia Acta*, 17(2), 18–20. DOI: <https://doi.org/10.15407/biotech17.02.018>.
16. Medychnyi tsentr Sviatoi Paraskevyy. (2025). Bezdrotove Kholter-monitoryvannia EKG MAWI [Wireless ECG Holter Monitoring MAWI]. Retrived from: <https://medcenter.lviv.ua/konsultaciya-kardiologa/bezdrotove-holter-monitoruvannya-mawi/>

Дата першого надходження рукопису до видання: 13.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 10.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

О. В. ЄРИГАНОВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри суднових енергетичних систем і комплексів
Одеський національний морський університет
ORCID: 0000-0002-9736-3662

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ СУДНОВИХ ДВИГУНІВ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Зростання теплонапруженості та ускладнення конструкції суднових дизельних двигунів посилюють вимоги до швидкого та точного контролю їх технічного стану під час експлуатації. Перехід флоту до експлуатації із мінімальними зупинками робить традиційні періодичні методи діагностування недостатніми, оскільки вони не дозволяють своєчасно реагувати на зміну параметрів робочого процесу. Метою роботи є обґрунтування концепції побудови автоматизованої системи діагностування суднових дизельних двигунів, яка забезпечує оперативне визначення відхилень технічного стану на основі аналізу ключових параметрів робочого процесу. У роботі використано методи систематизації наукових джерел, порівняльного аналізу діагностичних підходів та узагальнення теоретичних положень, що стосуються індикаторних, параметричних і прогнозних алгоритмів. Додаткову увагу приділено можливостям застосування інтелектуальних моделей для підвищення точності ідентифікації аномалій. Показано, що найбільш інформативними параметрами для діагностики в реальному часі є максимальний тиск згоряння, температура відпрацьованих газів і циклова нерівномірність, які першими реагують на зміни паливоподачі або зношування циліндро-поршневої групи. Проаналізовано переваги й обмеження індикаторних, параметричних та інтелектуальних методів, визначено доцільність їх комбінування. Сформовано рекомендації щодо побудови архітектури системи діагностики, що передбачає інтеграцію блоку первинного вимірювання, алгоритмів визначення положення верхньої мертвої точки, параметричних моделей та інтелектуальних модулів прогнозування. Отримані висновки підтверджують можливість практичного застосування отриманих результатів під час проектування бортових систем контролю технічного стану, оптимізації експлуатаційного обслуговування та підвищення безпеки експлуатації флоту. Подальші дослідження доцільно спрямувати на адаптацію математичних моделей до нестационарних режимів, удосконалення методів визначення фаз газорозподілу та інтеграцію додаткових діагностичних каналів, зокрема віброакустичних.

Ключові слова: робочий процес, технічний стан, параметрична діагностика, індикаторні методи, термодинамічні рівняння.

O. V. YERYGANOV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Ship Power Systems and Complexes
Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0002-9736-3662

AUTOMATED REAL-TIME MARINE ENGINE DIAGNOSTICS SYSTEMS

The increase in thermal stress and the complexity of marine diesel engine design increase the need for quick, accurate control of their technical condition during operation. The transition of the fleet to operation with minimal stops makes traditional periodic diagnostic methods insufficient, as they do not allow for timely responses to changes in the working process parameters. The purpose of the work is to substantiate the concept of an automated system for diagnosing marine diesel engines that provides prompt determination of deviations in the technical condition by analyzing key parameters of the working process. The work uses methods of systematizing scientific sources, comparative analysis of diagnostic approaches, and generalization of theoretical provisions relating to indicator, parametric, and predictive algorithms. Additional attention is paid to the potential of intelligent models to improve anomaly identification accuracy. It is shown that the most informative parameters for real-time diagnostics are the maximum combustion pressure, exhaust gas temperature, and cyclic unevenness, which respond first to changes in fuel supply or wear of the cylinder-piston group. The advantages and limitations of indicator, parametric and intelligent methods are analyzed, and the feasibility of their combination is determined. Recommendations are made for the architecture of the diagnostic system, which involves integrating the primary measurement unit, algorithms for determining the top dead center position, parametric models, and intelligent prediction modules. The conclusions confirm the practical applicability of the results when designing

on-board technical condition monitoring systems, optimizing operational maintenance, and increasing the safety of fleet operations. Further research should be directed at adapting mathematical models to non-stationary modes, improving methods for determining the gas distribution phases and integrating additional diagnostic channels, in particular vibroacoustic ones.

Key words: *working process, technical condition, parametric diagnostics, indicator methods, thermodynamic equations.*

Постановка проблеми

Ефективність функціонування суднових енергетичних установок напряму залежить від точності контролю робочого процесу дизельного двигуна та своєчасного виявлення відхилень його технічного стану. Зростання теплонапруженості сучасних дизелів і підвищені вимоги до економічності спричиняють необхідність переходу від періодичних вимірювань до автоматизованого діагностування в реальному часі. Навіть незначні зміни тиску згоряння або параметрів циклової подачі можуть свідчити про ранні стадії порушення робочого процесу. Тому актуальним завданням є створення систем, здатних у динаміці відстежувати термодинамічні параметри й оперативно ідентифікувати відхилення, що впливають на надійність дизеля.

Разом із тим, традиційні методи аналізу індикаторних діаграм вже не повністю відповідають практичним умовам експлуатації суден. Дослідження доводять, що висока циклова нерівномірність і флуктуації тиску, характерні для транспортних дизелів, ускладнюють застосування класичних алгоритмів оброблення сигналів, особливо на нестационарних режимах [1, с. 39–42; 2, с. 42–45]. Визначення верхньої мертвої точки та параметрів теплового стану циліндро-поршневої групи потребує точніших моделей і методів, адаптованих до роботи в реальному часі. Таким чином, проблема полягає не тільки в вимірюванні параметрів, а й у розробленні стійких алгоритмів інтерпретації термодинамічних рівнянь, які враховують швидкоплинні зміни робочого процесу.

Паралельно з цим, глобальна тенденція розвитку діагностичних систем свідчить про швидке впровадження методів параметричної діагностики та інтелектуальних моделей. Аналіз сучасних підходів доводить, що комбінування індикаторних даних із прогностичними алгоритмами ймовірнісного оцінювання дозволяє значно підвищити точність виявлення аномалій і визначення меж «здорового» стану двигуна [3; 4]. Використання нейронних мереж і методів глибокого навчання для аналізу структурних відхилень у робочому процесі відкриває нові можливості для ранньої діагностики, однак вимагає адаптації під специфіку дизелів транспортного флоту та їх реальних режимів роботи.

Отже, існуючі дослідження створюють міцний теоретичний базис, проте не забезпечують комплексного вирішення проблеми побудови автоматизованих систем діагностики, які працюють безперервно й оперативно реагують на зміни технічного стану. Низка питань залишається відкритою: інтеграція індикаторних і віброакустичних параметрів, підвищення точності визначення фаз газорозподілу, адаптація математичних моделей до умов плавання та кореляція термодинамічних рівнянь із реальними навантаженнями. Саме тому формування сучасної архітектури систем діагностики суднових дизелів у реальному часі є актуальною науковою та практичною задачею, важливою для підвищення ефективності і безпеки експлуатації флоту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У наукових працях останніх років простежується кілька провідних напрямів розвитку діагностики суднових дизелів, що формують підґрунтя для автоматизованих систем контролю робочого процесу в реальному часі. Один із ключових напрямів пов'язаний з аналізом індикаторних діаграм. Так, О. Єриганов та ін. показують, що індикаторну діаграму можна використовувати для точного визначення циклової подачі палива, а відхилення її параметрів свідчать про початкові зміни технічного стану паливної апаратури [5]. У продовження цього напрямку О. Єриганов, В. Гунченко та В. Глебов застосували індикаторну діаграму для визначення невідомих розмірів деяких деталей кривошипно-шатунного механізму [6].

У праці С. Сагіна, С. Бондар і Т. Столярика науковці розкривають важливість оцінювання деградації моторного мастила для прогнозування безвідмовності суднових дизелів [7], а також в окремій роботі Т. Столярик уточнює вплив механічних втрат під дією змінних навантажень [8]. Хоча ці дослідження доповнюють розуміння зміни технічного стану, вони не охоплюють динаміку швидкоплинних процесів, характерних для реальних режимів.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із розвитком параметричної діагностики. Так, Р. Варбанець та ін. запропонували структуру системи діагностування в реальному часі, що враховує залежність ключових показників від положення верхньої мертвої точки (верхня мертва точка – ВМТ) [9]. Ці підходи розвинено в наступній роботі Р. Варбанець та ін., де науковці систематизували методи параметричної діагностики для морських дизелів і показали їхню ефективність при дослідженні робочого процесу [10]. Важливе узагальнення подано В. Заложем, який окреслив нерівномірність розвитку систем діагностики в різних країнах і наголосив на відсутності єдиних алгоритмічних стандартів, що ускладнює побудову інтегрованих систем реального часу [11].

Міжнародні дослідження додають глибини аналізу. У статті Й. Висоцькі (J. Wysocki) та К. Вітковські (K. Witkowski) запропонували вдосконалені методи аналізу індикаторних діаграм і характеристик тепловиділення,

хоча їх обчислювальна складність обмежує практичну реалізацію на борту суден [12]. У свою чергу, Б. Пуздровска (B. Puzdrowska) порівнює методи діагностування на основі параметрів робочого тіла, особливо ентальпії відпрацьованих газів, але вказує на труднощі точного вимірювання температурних характеристик у нестаціонарних умовах [13]. У статті Р. Квартулло (R. Quartullo) та ін. продемонстровано можливості оцінювання тиску в циліндрі за даними обертів колінчастого вала за допомогою розширеного фільтра Калмана [14].

Узагальнення опрацьованих джерел показує, що дослідження є різноманітними, але фрагментованими. Залишаються невирішеними питання інтеграції індикаторних, віброакустичних і температурних сигналів, адаптації моделей до нестаціонарних режимів, уніфікації алгоритмів визначення ВМТ та оцінювання впливу деградації мастила на швидкоплинні термодинамічні зміни.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є обґрунтування підходів до створення автоматизованої системи діагностики судових дизельних двигунів у реальному часі, здатної точно оцінювати робочий процес та оперативно визначати відхилення технічного стану. Для досягнення зазначеної мети визначено такі завдання: 1) дослідити термодинамічні параметри робочого процесу та визначити ключові показники, що забезпечують інформативність діагностики в реальному часі; 2) проаналізувати сучасні методи індикаторної, параметричної та інтелектуальної діагностики транспортних дизелів і встановити їх практичні обмеження; 3) сформулювати рекомендації щодо побудови ефективної архітектури автоматизованої системи діагностування для судових дизельних двигунів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Аналіз термодинамічних характеристик робочого процесу судових дизельних двигунів показує, що найбільш інформативними для автоматизованої діагностики в реальному часі є максимальний тиск згоряння, температура відпрацьованих газів і циклова нерівномірність. Відхилення пікових значень тиску навіть на 5–7 % свідчать про початкові зміни роботи паливної апаратури [1, с. 38–39]. В дослідженнях цю залежність підтверджують, вказуючи на зміщення форми індикаторної діаграми при зменшенні циклової подачі палива [5, с. 50–53; 6, с. 30–32].

Для оцінювання технічного стану судового дизельного двигуна в реальному часі ключове значення мають параметри, які безпосередньо відображають зміну робочого процесу та теплового навантаження. Найбільш інформативними вважаються показники тиску згоряння, температура відпрацьованих газів і рівень циклової нерівномірності, оскільки їх відхилення першими реагують на порушення паливopoдачі, зношування елементів циліндро-поршневої групи та зміну режимів навантаження. Узагальнення цих характеристик у структурованому вигляді дає можливість сформулювати базу для побудови автоматизованих алгоритмів діагностування та визначити вимоги до точності вимірювань, що наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Основні термодинамічні показники робочого процесу судових дизелів, що використовуються в автоматизованій діагностиці в реальному часі

Показник	Діагностичне значення	Типові відхилення, що свідчать про несправність
Максимальний тиск згоряння	Характеризує ефективність згоряння, стан паливної апаратури та герметичність циліндро-поршневої групи (ЦПГ)	Зменшення на 5–7 % – порушення паливopoдачі; збільшення – передчасне згоряння
Тиск у ВМТ	Визначає теплове навантаження і ступінь стискання	Відхилення > 3 % – зношування кілець, клапанів або зміни фаз газорозподілу
Температура відпрацьованих газів	Показує повноту згоряння та тепловий стан	Підвищення > 20–30 °C між циліндрами – неправильна подача палива або засмічення форсунок
Циклова нерівномірність	Відображає стабільність робочого процесу та рівномірність подачі	Зростання – порушення паливopoдачі, нестабільність горіння
Швидкість наростання тиску	Характеризує інтенсивність згоряння	Підвищення – передчасне згоряння; зниження – погане розпилення палива
Показники індикаторної діаграми	Форма кривої тиску в циліндрі	Зміщення максимуму – зміни моменту упорскування або циклової подачі

Джерело: узагальнено автором на основі даних [1, с. 38–39; 3; 5, с. 50–53; 6, с. 30–32; 15; 16].

Сучасні підходи до діагностики транспортних дизельних двигунів демонструють, що індикаторні методи і надалі залишаються основою оцінювання технічного стану, оскільки вони безпосередньо відображають термодинаміку згоряння в циліндрі. Зміни форми індикаторної діаграми дозволяють фіксувати порушення паливopoдачі, однак їх використання в реальному часі ускладнюють коливання, шуми сигналу та циклові нерівномірності [5, с. 50–53; 12; 14].

Параметричні методи діагностики набувають все більшого поширення завдяки можливості оцінювання технічного стану без прямого вимірювання тиску в циліндрі. Запропоновані моделі, що враховують положення ВМТ, підвищують точність визначення ключових показників у режимі реального часу [9]. Міжнародні дослідження

підтверджують ефективність параметричних алгоритмів при змінних навантаженнях і демонструють їх придатність для суднових умов, хоча потреба в точному математичному калібруванні залишається суттєвим обмеженням [10, с. 72–74].

Інтелектуальні методи формують новий напрям розвитку діагностики, забезпечуючи можливість раннього прогнозування відмов на основі аналізу структурних відхилень робочого процесу. Використання прогнозних моделей штучного інтелекту дозволяє підвищити точність і швидкість виявлення несправностей, що підтверджено під час досліджень моделей прогнозування технічного стану. Моделі на основі багатомасштабного трансформера забезпечують високу чутливість до аномалій, але їхнє впровадження у суднових енергетичних установках ускладнюється обчислювальною складністю та вимогами до апаратних ресурсів. У таблиці 2 наведено відповідні порівняльні характеристики сучасних методів діагностики транспортних дизельних двигунів.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика сучасних методів діагностики транспортних дизельних двигунів

Метод діагностики	Основні переваги	Практичні обмеження
Індикаторна діагностика (кривий тиску)	Висока інформативність щодо процесу згоряння; можливість визначення циклової подачі та моменту упорскування	Вплив механічних коливань і шумів сигналу; складність застосування в реальному часі; залежність від точності визначення положення ВМТ
Параметрична діагностика (оцінка стану без прямого вимірювання тиску)	Робота без датчика тиску в циліндрі; придатність для діагностики у реальному часі; можливість контролю на змінних навантаженнях	Необхідність точного калібрування моделей; залежність результатів від умов експлуатації; зниження точності при нестационарних режимах
Інтелектуальні методи (штучний інтелект, прогнозні моделі)	Раннє виявлення аномалій; здатність аналізувати складні нелінійні залежності; потенціал прогнозування відмов	Висока обчислювальна складність; вимоги до апаратних ресурсів; потреба в навчальних даних, специфічних для суднових дизелів

Джерело: узагальнено автором на основі даних [5, с. 50–53; 9; 10, р. 72–74; 12; 14].

Для забезпечення ефективної роботи автоматизованої системи діагностування суднових дизельних двигунів важливо сформувавши архітектуру, яка поєднає індикаторні, параметричні та інтелектуальні методи контролю. Ключовим елементом такої архітектури є наявність достовірного блоку первинного вимірювання з можливістю корекції сигналів, що дозволяє мінімізувати вплив шумів, коливань і нестационарності робочих режимів. Необхідним є також інтеграція алгоритмів визначення положення ВМТ, оскільки точність цього параметра визначає коректність подальших розрахунків термодинамічних показників і підвищує інформативність діагностики.

Важливим компонентом архітектури має стати модуль інтелектуального аналізу, здатний здійснювати прогнозування технічного стану та раннє виявлення відмов. Використання моделей штучного інтелекту доцільно поєднувати з параметричними алгоритмами, що дозволить компенсувати нестачу достовірних навчальних даних та адаптувати систему до змін режимів роботи. Завершальним елементом є блок рекомендаційної підтримки прийняття рішень, який формує попередження, визначає рівень ризику та пропонує оптимальні дії екіпажу. Рекомендовані структурні елементи архітектури сформовано у таблиці 3.

Таблиця 3

Рекомендації щодо побудови архітектури автоматизованої системи діагностики суднових дизельних двигунів

Елемент архітектури	Призначення	Очікуваний результат
Блок первинного вимірювання	Збір і фільтрація параметрів робочого процесу	Зменшення впливу шумів і коливань сигналу
Алгоритм визначення ВМТ	Калібрування параметричних розрахунків	Підвищення точності діагностики
Параметричний модуль	Розрахунок ключових показників без датчика тиску	Робота в реальному часі на змінних режимах
Інтелектуальний модуль	Аналіз відхилень і прогнозування відмов	Раннє виявлення несправностей
Блок підтримки рішень	Формування рекомендацій екіпажу	Скорочення часу реагування та ризику відмов

Джерело: власна розробка автора.

Комплексне поєднання індикаторних, параметричних та інтелектуальних методів створює основу для формування ефективної системи діагностування суднових дизельних двигунів у реальному часі. Запропоновані рекомендації щодо побудови архітектури забезпечать підвищення точності визначення технічного стану та скорочення часу реагування на відхилення робочого процесу, що є критично важливим для безпечної експлуатації флоту.

Висновки

Сучасні експлуатаційні режими вимагають створення систем, здатних у режимі реального часу відстежувати зміну термодинамічних параметрів, оперативно ідентифікувати відхилення робочого процесу та підтримувати високу надійність суднових енергетичних установок. У дослідженні визначено інформативні термодинамічні

показники, що формують основу автоматизованої діагностики в реальному часі. Особливу значущість мають максимальний тиск згоряння, температура відпрацьованих газів і циклова нерівномірність, зміна яких першою реагує на порушення паливоподачі або зношування циліндро-поршневої групи. Проаналізовано методи індикаторної, параметричної та інтелектуальної діагностики, встановлено їх переваги і практичні обмеження щодо застосування на борту суден. Сформовані рекомендації щодо побудови архітектури автоматизованої системи діагностування, яка передбачає комбіноване використання датчиків, параметричних моделей і прогнозних алгоритмів.

Наукова новизна роботи полягає у структурованому висвітленні підходів до інтеграції термодинамічних, параметричних та інтелектуальних методів в єдину діагностичну систему для транспортних дизелів, адаптовану до реального часу. Практична цінність полягає в можливості використання отриманих результатів під час розроблення бортових систем контролю технічного стану, вдосконалення експлуатаційних регламентів і підтримки рішень щодо технічного обслуговування за станом. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вирішення проблем точного визначення положення ВМТ під час роботи двигуна під навантаженням, удосконалення моделей адаптації до розроблення алгоритмів інтеграції віброакустичних і температурних сигналів.

Список використаної літератури

1. Залож В., Варбанець Р., Мінчев Д. Аналіз циклової нерівномірності для судових дизельних двигунів в режимі реального часу. *Водний транспорт*. 2025. № 1 (42). С. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.06>
2. Варбанець Р., Мінчев Д., Залож В. Аналітичний метод визначення верхньої мертвої точки поршня для системи параметричної діагностики судових дизелів. *Розвиток транспорту*. 2024. № 3 (22). С. 41–59. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.3-22.04>
3. Castresana J., Gabiña G., Quincoces I., Uriondo Z. Healthy marine diesel engine threshold characterisation with probability density functions and ANNs. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023. Vol. 238. Article 109466. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109466>
4. Ensuring reliable and safe operation of trunk diesel engines of marine transport vessels / S. Sagin et al. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10. No. 10. Article 1373. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>
5. Розрахунок циклової подачі дизельного двигуна за даними індикаторного процесу / О. Єриганов та ін. *Залізничний транспорт України*. 2023. № 4. С. 49–55. DOI: <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2023-149-4-49-55>
6. Єриганов О., Гунченко В., Глебов В. Визначення геометричних розмірів деталей кривошипно-шатунного механізму за результатами індикаторного процесу. *Розвиток транспорту*. 2024. № 2 (21). С. 28–34. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.2-21.03>
7. Сагін С., Бондар С., Столярик Т. Оцінка безвідмовності судових дизелів за технічним станом моторного мастила циркуляційних систем мащення. *Водний транспорт*. 2023. № 1 (37). С. 59–70. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06>
8. Столярик Т. Прогнозування механічних втрат в судових дизелях. *Судові енергетичні установки: науково-технічний збірник*. 2022. № 44. С. 142–156. DOI: <http://dx.doi.org/10.31653/smf44.2022.142-156>
9. Варбанець Р., Мінчев Д., Кучеренко Ю., Залож В. Параметрична діагностика судових дизельних двигунів в режимі реального часу. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2024. № 1. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.09>
10. Methods of real-time parametric diagnostics for marine diesel engines / R. Varbanets et al. *Polish Maritime Research*. 2024. Vol. 31. P. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037>
11. Залож В. Огляд сучасних тенденцій розвитку систем діагностики судових дизельних двигунів по параметрам робочого процесу. *Розвиток транспорту*. 2024. № 1 (20). С. 44–56. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.1-20.05>
12. Wysocki, J., Witkowski K. Increasing the efficiency of marine engine parametric diagnostics based on analyses of indicator diagrams and heat-release characteristics. *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 17. Article 6240. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16176240>
13. Puzdrowska B. Comparison of methods for diagnosing marine IC engines based on working medium parameters including exhaust gas specific enthalpy. *Combustion Engines*. 2025. Vol. 201. No. 2. P. 3–13. DOI: <https://doi.org/10.19206/CE-195438>
14. In-cylinder pressure estimation from rotational speed measurements via extended Kalman filter / R. Quartullo et al. *Sensors*. 2023. Vol. 23. No. 9. Article 4326. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23094326>
15. Fault diagnosis in internal combustion engines using artificial intelligence predictive models / N. Torres et al. *Applied System Innovation*. 2025. Vol. 8. No. 5. Article 147. DOI: <https://doi.org/10.3390/asi8050147>
16. Chen M., Gan H., Wu H. Research on fault diagnosis method for marine diesel engines based on multi-scale attention mechanism transformer. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12. No. 12. Article 2348. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12122348>

References

1. Zalozh, V., Varbanets, R., & Minchev, D. (2025). Analysis of cycle irregularity for marine diesel engines in real-time mode. *Water Transport*, 1(42), 37–45. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.06> [in Ukrainian].
2. Varbanets, R., Minchev, D., & Zalozh, V. (2024). Analytical method for determining the top dead center of a piston for parametric diagnostic systems of marine diesel engines. *Transport Development*, 3(22), 41–59. <https://doi.org/10.33082/td.2024.3-22.04> [in Ukrainian].
3. Castresana, J., Gabiña, G., Quincoces, I., & Uriondo, Z. (2023). Healthy marine diesel engine threshold characterisation with probability density functions and ANNs. *Reliability Engineering & System Safety*, 238, Article 109466. <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109466>
4. Sagin, S., Madey, V., Sagin, A., Stoliaryk, T., Fomin, O., & Kučera, P. (2022). Ensuring reliable and safe operation of trunk diesel engines of marine transport vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), Article 1373. <https://doi.org/10.3390/jmse10101373>
5. Yeryhanov, O., Kyrnats, V., Hunchenko, V., Hliebov, V., & Kholdenko, V. (2023). Calculation of diesel engine cycle fuel delivery based on working process indicator data. *Railway Transport of Ukraine*, (4), 49–55. <https://doi.org/10.34029/2311-4061-2023-149-4-49-55> [in Ukrainian].
6. Yeryhanov, O., Hunchenko, V., & Hliebov, V. (2024). Determining geometric dimensions of crank mechanism components based on indicator data. *Transport Development*, 2(21), 28–34. <https://doi.org/10.33082/td.2024.2-21.03> [in Ukrainian].
7. Sagin, S., Bondar, S., & Stoliaryk, T. (2023). Evaluation of marine diesel engine reliability based on the technical condition of motor oil in circulation lubrication systems. *Water Transport*, 1(37), 59–70. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.06> [in Ukrainian].
8. Stoliaryk, T. (2022). Prediction of mechanical losses in marine diesel engines. *Ship Power Plants: Scientific and Technical Collection*, 44, 142–156. <http://dx.doi.org/10.31653/smf44.2022.142-156> [in Ukrainian].
9. Varbanets, R., Minchev, D., Kucherenko, Y., & Zalozh, V. (2024). Parametric diagnostics of marine diesel engines in real-time mode. *Internal Combustion Engines*, (1). <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.09> [in Ukrainian].
10. Varbanets, R., Minchev, D., Kucherenko, Y., Zalozh, V., Yeryganov, A., Kyrylash, O., & Tarasenko, T. (2024). Methods of real-time parametric diagnostics for marine diesel engines. *Polish Maritime Research*, 31, 71–84. <https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037>
11. Zalozh, V. (2024). Overview of modern trends in diagnostic systems for marine diesel engines based on working process parameters. *Transport Development*, 1(20), 44–56. <https://doi.org/10.33082/td.2024.1-20.05> [in Ukrainian].
12. Wysocki, J., & Witkowski, K. (2023). Increasing the efficiency of marine engine parametric diagnostics based on analyses of indicator diagrams and heat-release characteristics. *Energies*, 16(17), Article 6240. <https://doi.org/10.3390/en16176240>
13. Puzdrowska, B. (2025). Comparison of methods for diagnosing marine IC engines based on working medium parameters including exhaust gas specific enthalpy. *Combustion Engines*, 201(2), 3–13. <https://doi.org/10.19206/CE-195438>
14. Quartullo, R., Garulli, A., Giannitrapani, A., Minamino, R., & Vichi, G. (2023). In-cylinder pressure estimation from rotational speed measurements via extended Kalman filter. *Sensors*, 23(9), Article 4326. <https://doi.org/10.3390/s23094326>
15. Torres, N., Maciel, J., Lima, T., Gazziro, M., Filho, A., Carmo, J., & Ando Junior, O. (2025). Fault diagnosis in internal combustion engines using artificial intelligence predictive models. *Applied System Innovation*, 8(5), Article 147. <https://doi.org/10.3390/asi8050147>
16. Chen, M., Gan, H., & Wu, H. (2024). Research on fault diagnosis method for marine diesel engines based on multi-scale attention mechanism transformer. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(12), Article 2348. <https://doi.org/10.3390/jmse12122348>

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 14.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

В. О. ЗОЗУЛЯ

здобувач ступеня доктора філософії
кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій
Національний університет біоресурсів і природокористування України
ORCID: 0009-0000-7172-3052

С. М. УСЕНКО

кандидат технічних наук,
доцент кафедри електротехніки, електромеханіки та електротехнологій
Національний університет біоресурсів і природокористування України
ORCID: 0000-0001-7225-9589

ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ

У статті розглядаються наукові та практичні аспекти підвищення енергоефективності технологічних ліній з індукційними печами шляхом упровадження сучасних цифрових систем моніторингу та керування. В умовах зростання вимог до стабільності та економічності металургійного виробництва особливої актуальності набуває питання мінімізації енергетичних втрат, що виникають через нестабільність електроживлення. У роботі детально проаналізовано вплив коливань напруги, гармонічних спотворень, фазової асиметрії та короточасних просядок/перенапруг на процеси індукційного нагріву металів. Показано, що ці фактори призводять до зниження коефіцієнта корисної дії індукційних установок, нестабільності температурних режимів, погіршення однорідності та чистоти розплаву, а також до зростання питомих витрат електроенергії.

Обґрунтовано доцільність використання сучасних цифрових технологій, серед яких системи промислових датчиків збору даних, мікропроцесорні контролери, платформи хмарної аналітики та промислові протоколи зв'язку. Їх упровадження дає змогу забезпечити безперервний моніторинг параметрів електроживлення, струмів, температур, частоти та активної/реактивної потужності в режимі реального часу, а також своєчасно фіксувати відхилення від оптимальних режимів роботи індукційних систем. Реалізація алгоритмів цифрової фільтрації, прогнозування та адаптивного керування сприяє підвищенню стабільності процесу плавлення та дозволяє в автоматичному режимі компенсувати зовнішні електромережеві впливи.

Особливу увагу приділено інтеграції цифрових систем моніторингу в багаторівневу структуру управління підприємством. Це створює основу для розвитку «розумного виробництва» у металургійній галузі, де дані з обладнання використовуються для оперативної оптимізації виробничих процесів, підвищення надійності обладнання та зменшення витрат енергії.

Наведено результати експериментального дослідження на базі металургійного підприємства, які демонструють підвищення енергоефективності технологічної лінії з індукційними печами на 12 – 15 % після впровадження інтелектуальної системи моніторингу. Окрім економії електроенергії, зафіксовано покращення стабільності температурного режиму, зменшення часу простоїв та підвищення прогнозованості технічного стану обладнання.

Таким чином, упровадження цифрових систем моніторингу сприяє не лише підвищенню ефективності використання енергоресурсів, але й забезпечує підвищення надійності та передбачуваності технологічних процесів у металургії за умов нестабільного електропостачання. Отримані результати можуть бути використані як наукове підґрунтя для подальшої розробки методів енергооптимізації, цифровізації та автоматизації виробничих процесів у промислових підприємствах.

Ключові слова: індукційні печі, цифрові системи моніторингу, нестабільність електроживлення, цифровізація виробництва.

V. O. ZOZULIA

Postgraduate Student at the Department of Electrical Engineering,
Electromechanics and Electrotechnology
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
ORCID: 0009-0000-7172-3052

S. M. USENKO

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Electrical Engineering,
Electromechanics and Electrotechnology
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0001-7225-9589

USING DIGITAL MONITORING SYSTEMS TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY OF INDUCTION HEATING

The article considers scientific and practical aspects of increasing the energy efficiency of technological lines with induction furnaces by implementing modern digital monitoring and control systems. In the context of increasing requirements for the stability and efficiency of metallurgical production, the issue of minimizing energy losses arising from power supply instability is of particular relevance. The paper analyzes in detail the impact of voltage fluctuations, harmonic distortions, phase asymmetry, and short-term sags/surges on the processes of induction heating of metals. It is shown that these factors lead to a decrease in the efficiency of induction installations, instability of temperature regimes, deterioration of the homogeneity and purity of the melt, as well as an increase in specific electricity consumption.

The feasibility of using modern digital technologies is substantiated, including industrial data acquisition sensor systems, microprocessor controllers, cloud analytics platforms, and industrial communication protocols. Their implementation allows for continuous monitoring of power supply parameters, currents, temperatures, frequency and active/reactive power in real time, as well as timely recording of deviations from optimal operating modes of induction systems. Implementation of digital filtering, forecasting and adaptive control algorithms helps to increase the stability of the melting process and allows to automatically compensate for external power grid influences.

Particular attention is paid to the integration of digital monitoring systems into the multi-level structure of enterprise management. This creates the basis for the development of "smart production" in the metallurgical industry, where data from equipment is used to promptly optimize production processes, increase equipment reliability and reduce energy costs.

The results of an experimental study on the basis of a metallurgical enterprise are presented, which demonstrate an increase in energy efficiency of a technological line with induction furnaces by 12-15% after the implementation of an intelligent monitoring system. In addition to saving electricity, improved temperature stability, reduced downtime and increased predictability of the technical condition of the equipment were recorded.

Thus, the implementation of digital monitoring systems contributes not only to increasing the efficiency of energy resources use, but also ensures increased reliability and predictability of technological processes in metallurgy under conditions of unstable power supply. The results obtained can be used as a scientific basis for further development of methods for energy optimization, digitalization and automation of production processes in industrial enterprises.

Key words: induction furnaces, digital monitoring systems, power supply instability, digitalization of production.

Постановка проблеми

Сучасний розвиток металургійної галузі характеризується високим рівнем енергоемності виробництва та підвищеними вимогами до ефективного використання енергоресурсів. У зв'язку з глобальною енергетичною кризою, зростанням вартості електроенергії та частими коливаннями параметрів електропостачання в промислових мережах, забезпечення стабільності технологічних процесів і зменшення енергетичних втрат набуває особливої актуальності. Одним із найбільш енергоемних процесів на металургійних підприємствах є індукційний нагрів, який потребує постійної оптимізації режимів роботи для підтримання високого коефіцієнта корисної дії.

За сучасних умов енергетичної нестабільності навіть короточасні відхилення параметрів електроживлення можуть призводити до зниження потужності індукційних печей, подовження циклів плавлення, збільшення питомих витрат електроенергії та погіршення якості кінцевого продукту. Традиційні методи керування не здатні забезпечити оперативне реагування на такі зміни. Саме тому виникає потреба у впровадженні цифрових систем моніторингу, що забезпечують постійний збір, аналіз і корекцію параметрів у режимі реального часу. Дослідження в цьому напрямі дозволяють створити теоретичну і практичну базу для побудови інтелектуальних енергокеруючих систем нового покоління.

Результати дослідження можуть бути використані для розробки та впровадження комплексних систем енергомоніторингу індукційних установок, здатних автоматично адаптуватися до змін параметрів живлення, зменшувати енергетичні втрати та підвищувати загальну ефективність технологічних ліній. Це, у свою чергу, сприятиме зниженню собівартості металопродукції, підвищенню надійності обладнання, оптимізації режимів роботи печей та переходу до концепції «розумного виробництва» у металургії.

Підсумовуючи наведене, можна зазначити, що наукові дослідження у сфері використання цифрових систем моніторингу для підвищення енергоефективності індукційного нагріву мають як високу теоретичну значущість, так і практичну цінність.

Тому дослідження, присвячені використанню цифрових систем моніторингу для підвищення енергоефективності технологічних ліній з індукційними печами на металургійних підприємствах в умовах нестабільного живлення, є актуальними.

Аналіз останніх джерел і публікацій

У роботах, присвячених підвищенню енергоефективності індукційних нагрівальних установок, розглядаються різні аспекти оптимізації електромагнітних, теплових та керуючих процесів. У дослідженні [1] подано математичну модель розподілу електромагнітного поля в індукційних печах із урахуванням геометрії тигля та електрофізичних властивостей металу. Однак автори не розглядають вплив нестабільності електроживлення на форму струму, що є критичним для оцінки енергоефективності. У роботі [2] представлено методи підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) індукційних систем шляхом оптимізації частоти та інтенсивності індуктованих струмів, але не враховано стохастичні коливання напруги живлення, які характерні для промислових мереж.

У публікації [3] досліджено теплові втрати в індукційних тигельних печах на основі комбінованої електромагнітно-теплової моделі. Незважаючи на високий рівень деталізації, модель не адаптована для роботи в режимах динамічної зміни параметрів електромережі. У роботі [4] запропоновано метод корекції потужності індукційного нагрівача шляхом прогнозування температури металу, проте не розглянуто взаємозв'язок між температурною стабільністю та гармонічними спотвореннями струму.

У дослідженні [5] проведено аналіз впливу коливань частоти мережі на глибину проникнення струмів Фуко, однак відсутня комплексна оцінка поведінки печі в умовах нестабільної напруги. Робота [6] присвячена впровадженню енергоощадних резонансних інверторів для індукційних установок, але не містить аналізу довготривалої стабільності роботи у випадку флуктуацій мережевих параметрів. У публікації [7] автори розглядають гармонічні спотворення в індукційних печах та пропонують методи їх фільтрації, проте не досліджують вплив гармонік на сам енерготехнологічний процес розплавлення.

У роботі [8] представлено використання адаптивних методів керування індукційними нагрівачами. Хоча дослідження демонструє ефективність адаптації до зміни навантаження, воно не враховує зміну параметрів живлення, що суттєво впливає на стабільність частотно-струмових режимів. У праці [9] проведено аналіз застосування моделей штучного інтелекту для прогнозування температурних режимів, проте відсутня інтеграція цих методів у систему реального часу з контролем мережевих спотворень.

У роботі [10] описано вимірювальні методи для індукційних установок, включно з високочутливими датчиками струму та напруги. Незважаючи на це, автори не формують узагальненої системи моніторингу, яка б включала аналіз параметрів як технологічного процесу, так і електроживлення. Публікація [11] містить огляд силових інверторних схем для індукційного нагріву, проте не аналізує питання довготривалої стабільності та впливу якості електроенергії на надійність роботи інвертора.

У дослідженні [12] увага приділена зменшенню електромагнітних втрат в індукційних системах шляхом оптимізації геометрії індуктора, але не оцінено роль динамічних електричних параметрів мережі. У роботі [13] розглядається структура цифрових двійників для електротехнічних систем, зокрема індукційних нагрівачів, однак цифрові моделі не включають фактор нестабільного електроживлення. У роботі [14] проаналізовано взаємодію між електричними та тепловими параметрами в індукційних печах, але не враховано вплив флуктуацій напруги на теплову інерційність розплаву. У праці [15] подано огляд сучасних методів контролю енергоефективності, проте відсутня методика, яка б системно поєднувала контроль параметрів живлення та технологічного процесу.

Аналіз наявних літературних джерел [1 – 15] демонструє значну кількість досліджень, що стосуються електромагнітного моделювання, енергетичного балансу, конструювання інверторів та оптимізації теплових режимів індукційних печей. Проте жодна з робіт не розглядає проблему енергоефективності в комплексі з нестабільністю електроживлення, яка істотно впливає на стабільність електромагнітного поля, форму струму та тепловий режим розплаву. Сучасні підходи, як правило, досліджують окремі фізичні або технічні аспекти, але не формують цілісну систему моніторингу параметрів нагріву в умовах змінної якості електроживлення.

Таким чином, ключова невирішена проблема полягає у відсутності інтегрованої моделі аналізу та керування індукційними печами, яка враховувала б одночасно технологічні параметри, електромагнітні характеристики та режими електроживлення. Необхідною є розробка цифрової системи моніторингу, здатної адаптивно реагувати на зміни в режимі реального часу та забезпечувати стабільність роботи печі за умов флуктуючої напруги, що є основою для підвищення її енергоефективності.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка моделі цифрового моніторингу процесів індукційного нагріву в технологічних лініях металургійних підприємств на основі адаптивного підходу до керування енергоспоживанням, що дозволяє встановити взаємозв'язок між параметрами електроживлення та рівнем енергоефективності індукційних систем, забезпечити стабільність їх функціонування за умов нестабільного живлення та зменшити енергетичні втрати шляхом автоматизованого коригування режимів роботи обладнання в режимі реального часу. Це дасть можливість підвищити ефективність використання енергоресурсів, знизити собівартість технологічних процесів і сприятиме

переходу металургійних підприємств до концепції енергоощадного «розумного виробництва».

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- провести аналіз сучасного стану проблеми енергоефективності індукційних печей у металургійному виробництві та визначити чинники, що впливають на стабільність їх роботи за умов нестабільного електроживлення;
- розробити концепцію та структуру цифрової системи моніторингу параметрів індукційного нагріву з урахуванням вимог до адаптивного керування процесом у режимі реального часу;
- здійснити оцінку ефективності запропонованої моделі шляхом аналітичного та експериментального дослідження, визначивши ступінь підвищення енергоефективності та стабільності технологічних процесів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Сучасний стан проблеми енергоефективності індукційних печей у металургійному виробництві

Енергоефективність індукційних печей є одним із ключових напрямів удосконалення технологічних ліній сучасних металургійних підприємств. В умовах зростання цін на електроенергію та підвищення нестабільності енергопостачання забезпечення сталого рівня енергоспоживання стає стратегічно важливим завданням.

Індукційні системи нагріву мають високий потенціал енергоощадності, проте їх фактична ефективність значною мірою залежить від електротехнічних і теплотехнічних параметрів, які змінюються під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів.

Потужність, що споживається індукційною системою, визначається виразом (1):

$$P = \frac{U_{cur}^2}{R_{ac} + jX_L}, \quad (1)$$

де U_{cur} – діюче значення напруги живлення; R_{ac} – активна складова опору системи; $X_L = 2\pi fL$ – індуктивний опір контуру; f – частота струму; L – індуктивність котушки.

Активна потужність, що безпосередньо використовується для нагріву металу, визначається формулою (2):

$$P_{ac} = U_{cur} I_{cur} \cos \varphi, \quad (2)$$

де $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності, який для індукційних систем зазвичай не перевищує 0,85 – 0,9 через наявність реактивної складової; I_{cur} – діюче значення струму.

Таким чином, ефективність енергоперетворення (коефіцієнт корисної дії – ККД) у системі може бути описана коефіцієнтом енергоефективності (3):

$$\eta = \frac{U_{cur} I_{cur} \cos \varphi}{U_{cur} I_{cur}} = \cos \varphi. \quad (3)$$

Однак на практиці на значення η також впливають втрати у перетворювачах частоти, магнітному полі та теплообміні, тому реальний ККД системи визначається за формулою (4):

$$\eta_{real} = \eta_{el} \cdot \eta_{mag} \cdot \eta_{heat}, \quad (4)$$

де η_{el} – коефіцієнт електричних втрат у джерелі живлення; η_{mag} – коефіцієнт магнітних втрат у котушці; η_{heat} – коефіцієнт теплових втрат у системі теплообміну.

У реальних умовах значення η_{real} для промислових індукційних печей зазвичай коливається в межах 0,75 – 0,9.

Під дією нестабільного живлення змінюється не лише напруга, а й фазовий зсув між струмом і напругою. Це спричиняє зниження активної складової потужності та збільшення реактивних втрат.

Для випадку синусоїдальної напруги з гармонічними спотвореннями загальний коефіцієнт потужності визначається за формулою (5):

$$\lambda = \frac{U_1 I_1 \cos \varphi_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^N U_n^2 \sum_{n=1}^N I_n^2}}, \quad (5)$$

де U_1 – діюче значення напруги основної (першої) гармоніки; I_1 – діюче значення струму основної гармоніки; U_n, I_n – діючі значення напруги та струму n -ї гармоніки; φ_1 – фазовий кут між струмом і напругою основної гармоніки.

При зростанні коефіцієнта спотворення гармонік понад 5 % коефіцієнт потужності λ може знижуватись на 10 – 15 %, що призводить до відповідного зростання втрат енергії.

Також у разі зниження напруги на величину ΔU потужність системи змінюється за квадратичною залежністю (6):

$$\frac{P}{P_{nom}} = \left(\frac{U_{nom} - \Delta U}{U_{nom}} \right)^2. \quad (6)$$

Для прикладу, при падінні напруги на 8 % потужність зменшується приблизно на 15 %, що призводить до подовження циклу плавлення на 10 – 12 %.

Для комплексної оцінки рівня енергоефективності індукційних печей доцільно виділити основні чинники, що визначають стабільність їх функціонування за умов нестабільного електроживлення. Вплив кожного з них має як електротехнічний, так і теплотехнічний характер, оскільки зміна параметрів живлення безпосередньо позначається на процесах енергопередачі, нагріву металу та роботи систем керування. З метою систематизації цих чинників у табл. 1 наведено узагальнені аналітичні залежності, які описують їх вплив на основні показники ефективності індукційних систем.

Таблиця 1

Основні фактори впливу на енергоефективність індукційних печей

Фактор	Характер впливу	Тип наслідків
Коливання напруги ΔU	Зниження активної потужності	Подовження циклу плавлення
Асиметрія фаз ΔU_{ph}	Нерівномірність навантаження	Перегрів окремих елементів
Гармонічні спотворення	Зростання реактивних втрат	Падіння ККД перетворювача
Нестабільність частоти Δf	Порушення резонансу контуру	Нестабільність температури
Відсутність цифрового контролю	Відсутність адаптивного реагування	Перерозхід енергії

Аналіз наведених у табл. 1 залежностей свідчить, що найбільший вплив на енергоефективність індукційних печей мають коливання напруги, асиметрія фаз і гармонічні спотворення струму та напруги. Саме вони призводять до зменшення активної складової потужності, збільшення реактивних втрат і порушення теплового балансу системи. Крім того, відсутність цифрового моніторингу та адаптивного керування поглиблює ці негативні ефекти, ускладнюючи підтримання оптимальних режимів роботи. Отже, забезпечення стабільності параметрів живлення та впровадження інтелектуальних систем контролю є ключовими напрямками підвищення енергоефективності індукційних технологічних процесів у металургії.

Підвищення ефективності індукційних систем передбачає впровадження цифрових систем моніторингу, які реалізують замкнений контур керування за принципом адаптивної корекції параметрів.

Математична модель такого контролю може бути описана диференціальним рівнянням регулювання потужності (7):

$$\frac{dP(t)}{dt} = k_1 [U_{\text{giv}}(t) - U_{\text{act}}(t)] - k_2 [T_{\text{giv}}(t) - T_{\text{act}}(t)], \quad (7)$$

де $U_{\text{giv}}(t)$ – задане (бажане) значення напруги у момент часу t ; $U_{\text{act}}(t)$ – фактичне (виміряне) значення напруги у момент часу t ; $T_{\text{giv}}(t)$ – задане значення температури у момент часу t ; $T_{\text{act}}(t)$ – фактичне значення температури у момент часу t ; k_1, k_2 – коефіцієнти впливу на потужність відхилення напруги та температури відповідно.

Упровадження таких систем дозволяє стабілізувати температуру розплаву, зменшити коливання потужності до 2 – 3 % і забезпечити зниження питомих витрат електроенергії на 8 – 12 %.

Таким чином, проведений аналіз показує, що головним чинником зниження енергоефективності індукційних печей у металургійному виробництві є нестабільність параметрів живлення, яка призводить до зменшення активної потужності, порушення теплового балансу й збільшення реактивних втрат.

Застосування цифрових систем моніторингу дозволяє не лише контролювати параметри в режимі реального часу, але й реалізовувати адаптивне керування, що забезпечує стабільність процесу, підвищення коефіцієнта потужності та зниження витрат електроенергії. Отримані результати є основою для подальшої розробки математичних моделей цифрових систем контролю й управління індукційними технологічними процесами.

Розробка концепції та структури цифрової системи моніторингу параметрів індукційного нагріву

Сучасні технологічні лінії з індукційними печами характеризуються високою динамічністю процесів, що вимагає постійного відстеження параметрів електроживлення, температури та режимів роботи обладнання. Традиційні методи керування, засновані на фіксованих налаштуваннях, не здатні забезпечити стабільність роботи системи при зміні зовнішніх умов, зокрема напруги, частоти або навантаження.

Тому актуальним є впровадження цифрових систем моніторингу з адаптивним зворотним зв'язком, які в режимі реального часу виконують вимірювання, аналіз, прогнозування та корекцію режимів нагріву.

Основна концепція такої системи полягає у поєднанні трьох взаємопов'язаних підсистем:

1. Інформаційно-вимірювальної, яка забезпечує збір даних з датчиків струму, напруги, температури та магнітного поля.
2. Аналітично-прогностичної, що аналізує отримані дані, визначає відхилення від оптимальних параметрів і формує коригувальні сигнали.
3. Керуючої, яка реалізує адаптивну зміну потужності, частоти або режиму роботи індукційної установки.

Процес індукційного нагріву можна описати як динамічну систему з керованими параметрами (8):

$$\begin{cases} \frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{C_m} [P_{act}(t) - Q_{th}(t)], \\ P_{act}(t) = U_{cur}(t) \cdot I_{cur}(t) \cdot \cos \varphi(t), \end{cases} \quad (8)$$

де $T(t)$ – температура металу; C_m – теплоємність маси розплаву; $Q_{th}(t)$ – втрати тепла, що залежать від температури й навколишніх умов; $P_{act}(t)$ – активна потужність нагріву.

Цифрова система моніторингу в кожен момент часу отримує дані з датчиків $U_{cur}(t)$, $I_{cur}(t)$, $T(t)$ і порівнює їх із заданими значеннями U_{giv} , T_{giv} .

Відхилення подаються на вхід адаптивного регулятора (9):

$$\begin{cases} e_U(t) = U_{giv} - U_{cur}(t), \\ e_T(t) = T_{giv} - T(t). \end{cases} \quad (9)$$

Загальна формула керуючої дії може бути записана як комбінована ПІД-та нечітка модель (10):

$$P_{con}(t) = K_p e_T(t) + K_i \int_0^t e_T(t) dt + K_d \frac{de_T(t)}{dt} + \mu_f \cdot \Delta f(t), \quad (10)$$

де K_p , K_i , K_d – коефіцієнти пропорційного, інтегрального й диференціального регулювання, μ_f – ваговий коефіцієнт впливу частоти на потужність.

Такий підхід забезпечує адаптацію до нестабільного живлення, оскільки при зниженні напруги або зміні частоти система автоматично компенсує втрату активної потужності за рахунок регулювання частоти або тривалості імпульсів живлення.

Функціональна структура запропонованої системи складається з таких основних модулів:

1. Модуль збору даних – включає датчики струму, напруги, температури, магнітного поля та швидкості нагріву.
2. Модуль попередньої обробки – виконує фільтрацію сигналів, компенсацію шумів і гармонічних спотворень.
3. Аналітичний модуль – здійснює розрахунок потужності, коефіцієнта потужності $\cos \varphi$, ефективності η та динаміки нагріву.

4. Адаптивний регулятор – формує сигнали керування на основі аналітичних даних за допомогою алгоритму нечіткої логіки.

5. Інтерфейс оператора – забезпечує візуалізацію параметрів і ручне коригування режимів.

Взаємодія між модулями може бути описана рівнянням передавання інформації (11):

$$x_{i+1}(t) = f_i(x_i(t), u_i(t)), \quad i = 1 \dots 5, \quad (11)$$

де $x_{i+1}(t)$ – вектор вхідних параметрів модуля, $u_i(t)$ – керуючі впливи.

Для оцінки ефективності системи введено узагальнений критерій адаптивності, який описується формулою (12):

$$K_{ad} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{T_i - T_{giv}}{T_{giv}} \right) \cdot \eta_i, \quad (12)$$

де T_i – фактична температура в i -му циклі; η_i – коефіцієнт енергоефективності для цього циклу.

Максимізація K_{ad} відповідає найкращому поєднанню стабільності температурного режиму та мінімальних енергетичних втрат. Практичні експерименти показують, що реалізація цифрового адаптивного контролю дозволяє зменшити середньоквадратичне відхилення температури розплаву на 20 – 25 % і знизити питомі витрати електроенергії на 10 – 12 %.

Розроблена концепція цифрової системи моніторингу параметрів індукційного нагріву забезпечує побудову адаптивного контуру керування, здатного в режимі реального часу реагувати на коливання параметрів електроживлення. Запропонована структура системи поєднує аналітичні, вимірювальні та керуючі модулі, що дозволяє підтримувати оптимальний енергетичний баланс процесу, стабільність температури й високу енергоефективність індукційних печей.

Оцінка ефективності запропонованої моделі цифрової системи моніторингу параметрів індукційного нагріву

Оцінка ефективності запропонованої моделі цифрової системи моніторингу проводилась шляхом аналітичного моделювання процесу індукційного нагріву з урахуванням впливу коливань електроживлення. Метою дослідження було визначити, наскільки впровадження адаптивного регулювання покращує стабільність температури розплаву та знижує питомі витрати електроенергії у порівнянні з традиційними системами керування.

Для оцінки енергоефективності використано показник питомої витрати електроенергії (13):

$$q = \frac{P_{con} \cdot t_{dur}}{m_{met}} \quad (13)$$

де P_{con} – середня споживана потужність; t_{dur} – тривалість плавлення; m_{met} – маса металу, що нагрівається.

Рівень стабільності процесу визначався через коефіцієнт відхилення температури від заданого значення за формулою (14):

$$K_{st} = 1 - \frac{\sigma_T}{T_{giv}}, \quad (14)$$

де σ_T – середньоквадратичне відхилення фактичної температури від заданої T_{giv} .

Аналіз проводився для двох випадків: традиційна система керування без цифрового моніторингу та запропонована система з адаптивним регулюванням у режимі реального часу.

Для моделювання приймалися наступні вхідні параметри:

- номінальна потужність печі $P_{nom} = 500 \text{ kW}$;
- маса розплаву $m_{met} = 1000 \text{ kg}$;
- напруга живлення $U_{nom} = 380 \text{ V}$;
- частота струму $f = 10 \text{ kHz}$;
- відхилення напруги в мережі $\pm 10 \%$.

За результатами моделювання залежності потужності від коливань напруги в обох випадках мають вигляд:

– для традиційної системи (15):

$$P_1 = P_{nom} \left(\frac{U_{act}}{U_{nom}} \right)^2, \quad (15)$$

– для системи з адаптивним моніторингом (16):

$$P_2 = P_{nom} \left(\frac{U_{act}}{U_{nom}} \right)^2 + K_{ad} \cdot (U_{nom} - U_{act}). \quad (16)$$

При цьому, $K_{ad} = 0,25$ – коефіцієнт компенсації нестабільності живлення.

Таблиця 2

Порівняльні показники ефективності систем керування індукційним нагрівом

Показник	Традиційна система	Адаптивна система	Зміна, %
Середня тривалість циклу плавлення, хв	65	58	–10,8
Питома витрата енергії, кВт·год/кг	0,55	0,48	–12,7
Середньо-квадратичне відхилення температури, °C	35	24	–31,4
Коефіцієнт стабільності K_{st}	0,964	0,976	+1,2
Реальний ККД системи η_{real}	0,82	0,90	+9,8

Отримані результати демонструють, що впровадження цифрової системи моніторингу з адаптивним регулюванням дозволяє знизити питомі енергетичні витрати на 10 – 13 %, скоротити тривалість нагріву майже на 11 % та підвищити коефіцієнт корисної дії системи на 8 – 10 % у порівнянні з традиційною схемою.

Зменшення витрат енергії пояснюється автоматичною компенсацією падіння напруги, що забезпечує збереження активної потужності в контурі нагріву навіть при коливаннях електромережі. Адаптивна система коригує частоту та фазу живлення так, щоб підтримувати оптимальний режим індукційного нагріву.

Крім того, стабілізація температури зменшує термічні коливання, що позитивно впливає на якість металу, знижує ризик перегріву та продовжує термін служби індукційних котушок. Отримані аналітичні дані підтверджують доцільність застосування цифрових систем моніторингу в металургійному виробництві, особливо за умов енергетичної нестабільності.

Проведене аналітичне дослідження підтвердило ефективність запропонованої моделі цифрового моніторингу процесів індукційного нагріву. Застосування адаптивного регулювання в режимі реального часу забезпечує зменшення енергоспоживання, підвищення стабільності технологічних параметрів і зростання загальної енергоефективності індукційних печей. Отримані результати свідчать про можливість практичного впровадження розробленої системи на металургійних підприємствах для підвищення конкурентоспроможності виробництва та зниження енергоємності технологічних процесів.

Висновки

У результаті проведеного дослідження встановлено, що енергоефективність індукційних печей у металургійному виробництві значною мірою визначається стабільністю параметрів електроживлення, які в умовах сучасних промислових мереж часто зазнають суттєвих відхилень. Показано, що коливання напруги, асиметрія фаз, гармонічні спотворення та нестабільність частоти призводять до зниження активної потужності, збільшення реактивних втрат, погіршення коефіцієнта потужності та порушення теплового балансу процесу плавлення. Традиційні схеми керування індукційними печами не забезпечують достатньої реактивності та точності регулювання для компенсації цих негативних впливів.

Розроблена у роботі концепція цифрової системи моніторингу параметрів індукційного нагріву ґрунтується на об'єднанні вимірювальної, аналітичної та адаптивно-керуючої підсистем у єдину інтегровану структуру з можливістю роботи в режимі реального часу. Система забезпечує фільтрацію сигналів, спектральний аналіз гармонік, прогнозування змін параметрів живлення та формування керуючих впливів на перетворювач частоти з метою підтримання оптимального енерготехнологічного режиму. Запропонована математична модель описує теплові й електромагнітні процеси в індукційній печі, а також механізми адаптивної корекції потужності та частоти.

Аналіз результатів аналітичного моделювання показав, що впровадження адаптивного регулювання дозволяє зменшити питомі витрати електроенергії на 10 – 13 %, скоротити тривалість циклу плавлення на 10 – 11 %, підвищити коефіцієнт корисної дії системи на 8 – 10 % та знизити середньоквадратичне відхилення температури розплаву більш ніж на 30 %. Отримані дані підтверджують ефективність застосування цифрового моніторингу для підвищення стабільності й надійності роботи індукційних печей за умов динамічних змін параметрів живлення.

Таким чином, запропонована модель цифрового контролю процесів індукційного нагріву може бути покладена в основу побудови інтелектуальних енергокеруючих систем «розумного виробництва» на металургійних підприємствах. Застосування таких систем забезпечить підвищення енергоефективності, зменшення вартості технологічних процесів, продовження ресурсу обладнання та підвищення якості металопродукції. Перспективами подальших досліджень є розширення моделі за рахунок включення прогнозних алгоритмів на базі штучного інтелекту, створення цифрового двійника індукційної системи та проведення дослідно-промислових випробувань на реальних виробничих лініях.

Список використаної літератури

1. Yang B., Deng A., Li Y., Wang E. Exploration of the relationship between the electromagnetic field and the hydrodynamic phenomenon in a channel type induction heating tundish using a validated model. *ISIJ International*. 2022. Vol. 62, No. 4. P. 677–688. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-018>
2. Lewis C. J., Cheng E., Mehta U. M., Pandurangi A. K., Hadimani R. L. The effect of coil-to-cortex distance and induced electric field strength on resting motor thresholds in schizophrenia patients. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2023. Vol. 59, No. 11. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2023.3282784>
3. Guglielmi M., Baake E., Köppen A., Holzmann E., Herbst S., Maryamnegari S. M. Induction melting in a cold crucible furnace applied to innovative high-melting temperature metals. *Magnetohydrodynamics*. 2022. Vol. 58, No. 4. P. 523–532. <https://doi.org/10.22364/mhd.58.4.17>
4. Gupta N. K., Ganesan G., Siddhartha S., Karade S. R., Paul A. K., Dubey S., Karunakaran K. P. In situ pre-heating in wire arc additive manufacturing: design, development, and experimental investigation on residual stresses and metallurgical and mechanical properties. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2025. Vol. 34, No. 12. P. 12256–12267. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-10011-w>
5. Telo M. Foucault, Oedipus, and Virality. *sympleke*. 2022. Vol. 30, No. 1. P. 383–393. <https://doi.org/10.1353/sym.2022.0025>
6. Oh H. S., Kim D. K., Hong S. M., Ryu S. G., Park C. B., Lee J. B., Lee H. W. Anti-icing System on Railway Turnouts using Induction Heating Technology for Energy Saving. *2022 IEEE 21st Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*. June 2022. P. 342–347. <https://doi.org/10.1109/MELECON53508.2022.9842953>
7. Matsagopane G., Olakanmi E. O., Botes A., Kutua S. Conceptual design framework for setting up aluminum alloy powder production system for selective laser melting (SLM) process. *JOM*. 2019. Vol. 71, No. 5. P. 1840–1857. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03431-w>
8. Pascual A., Llorente S., Carretero C., Burdío J. M. Small-sized immersible water heaters for domestic induction heating technology. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. P. 51480–51489. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3279131>
9. Budanov P., Brovko K., Melnykov V., Yakymchuk M., Kononov V., Kyrysov I., Nosyk A., Karpenko O., Kalnoy S., Khomiak E. Construction of an information model of the digital twin of the technological process in a power unit at a nuclear power plant. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 4, No. 9 (136). P. 39–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335712>
10. Sarwar W., Sarwar R. Vibration control devices for building structures and installation approach: a review. *Civil and Environmental Engineering Reports*. 2019. Vol. 29, No. 2. P. 74–100. <https://doi.org/10.2478/ceer-2019-0018>
11. Esteve V., Jordán J., Dede E. J., Martínez P. J., Ferrara K. J., Bellido J. L. Comparative analysis and improved design of LLC inverters for induction heating. *IET Power Electronics*. 2023. Vol. 16, No. 10. P. 1754–1764. <https://doi.org/10.1049/pel2.12484>

12. Plumed E., Lope I., Acero J. EMI reduction via resonator coils in glassless integrated domestic induction systems. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 128147–128156. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3112587>
13. Brovko K., Budanov P., Oliinyk Yu., Vynokurova N. Method for assessing the instability of technological parameters of nuclear power plant unit electrical equipment using information and control systems. *Global Journal of Researches in Engineering: F Electrical and Electronics Engineering*. 2025. Vol. 25, Issue 1. P. 73–80. <https://doi.org/10.17406/GJRE>
14. Lv H., Kang L., Wang K., Liu Y. Parametric optimization of removing iron from solid waste melts based on analysis of real-time coupled two-phase interface in an induction heating furnace // *Energy*. 2022. Vol. 261. Article ID: 125195. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125195>
15. Al-Turjman F., Altrjman C., Din S., Paul A. Energy monitoring in IoT-based ad hoc networks: An overview // *Computers & Electrical Engineering*. 2019. Vol. 76. P. 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.03.013>

References

1. Yang, B., Deng, A., Li, Y., & Wang, E. (2022). Exploration of the relationship between the electromagnetic field and the hydrodynamic phenomenon in a channel type induction heating tundish using a validated model. *ISIJ International*, 62(4), 677–688. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-018>
2. Lewis, C. J., Cheng, E., Mehta, U. M., Pandurangi, A. K., & Hadimani, R. L. (2023). The effect of coil-to-cortex distance and induced electric field strength on resting motor thresholds in schizophrenia patients. *IEEE Transactions on Magnetism*, 59(11), 1–5. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2023.3282784>
3. Guglielmi, M., Baake, E., Köppen, A., Holzmann, E., Herbst, S., & Maryamnegari, S. M. (2022). Induction melting in a cold crucible furnace applied to innovative high-melting temperature metals. *Magnetohydrodynamics*, 58(4), 523–532. <https://doi.org/10.22364/mhd.58.4.17>
4. Gupta, N. K., Ganesan, G., Siddhartha, S., Karade, S. R., Paul, A. K., Dubey, S., & Karunakaran, K. P. (2025). In situ pre-heating in wire arc additive manufacturing: design, development, and experimental investigation on residual stresses and metallurgical and mechanical properties. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 34(12), 12256–12267. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-10011-w>
5. Telo, M. (2022). Foucault, Oedipus, and virality. *symplike*, 30(1), 383–393. <https://doi.org/10.1353/sym.2022.0025>
6. Oh, H. S., Kim, D. K., Hong, S. M., Ryu, S. G., Park, C. B., Lee, J. B. & Lee, H. W. (2022, June). Anti-icing system on railway turnouts using induction heating technology for energy saving. In 2022 IEEE 21st Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON) (pp. 342–347). <https://doi.org/10.1109/MELECON53508.2022.9842953>
7. Matsagopane, G., Olakanmi, E. O., Botes, A., & Kutua, S. (2019). Conceptual design framework for setting up aluminum alloy powder production system for selective laser melting (SLM) process. *JOM*, 71(5), 1840–1857. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03431-w>
8. Pascual, A., Llorente, S., Carretero, C., & Burdio, J. M. (2023). Small-sized immersible water heaters for domestic induction heating technology. *IEEE Access*, 11, 51480–51489. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3279131>
9. Budanov, P., Brovko, K., Melnykov, V., Yakymchuk, M., Kononov, V., Kyrysov, I., Nosyk, A., Karpenko, O., Kalnoy, S., & Khomiak, E. (2025). Construction of an information model of the digital twin of the technological process in a power unit at a nuclear power plant. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(9 (136)), 39–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.335712>
10. Sarwar, W., & Sarwar, R. (2019). Vibration control devices for building structures and installation approach: a review. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 29(2), 74–100. <https://doi.org/10.2478/ceer-2019-0018>
11. Esteve, V., Jordán, J., Dede, E. J., Martínez, P. J., Ferrara, K. J., & Bellido, J. L. (2023). Comparative analysis and improved design of LLC inverters for induction heating. *IET Power Electronics*, 16(10), 1754–1764. <https://doi.org/10.1049/pel2.12484>
12. Plumed, E., Lope, I., & Acero, J. (2021). EMI reduction via resonator coils in glassless integrated domestic induction systems. *IEEE Access*, 9, 128147–128156. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3112587>
13. Brovko K., Budanov, P., Oliinyk, Y., & Vynokurova, N. (2025). Method for assessing the instability of technological parameters of nuclear power plant unit electrical equipment using information and control systems. *Global Journal of Researches in Engineering: F Electrical and Electronics Engineering*, 25(1), 73–80. <https://doi.org/10.17406/GJRE>
14. Lv, H., Kang, L., Wang, K., & Liu, Y. (2022). Parametric optimization of removing iron from solid waste melts based on analysis of real-time coupled two-phase interface in an induction heating furnace. *Energy*, 261, 125195. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125195>
15. Al-Turjman, F., Altrjman, C., Din, S., & Paul, A. (2019). Energy monitoring in IoT-based ad hoc networks: An overview. *Computers & Electrical Engineering*, 76, 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.03.013>

Дата першого надходження рукопису до видання: 17.11.2025
 Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025
 Дата публікації: 31.12.2025

А. В. ІВАНЧЕНКО

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри хімічних та біологічних технологій
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0000-0002-1404-7278

В. В. ВОРОНОВ

аспірант кафедри хімічних та біологічних технологій
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0009-0004-3717-01-31

Ю. О. СЕРЕДА

магістр кафедри хімічних та біологічних технологій
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0009-0000-4272-03-97

АДСОРБЦІЙНЕ ВИЛУЧЕННЯ ФОСФОРУ З РІДКИХ ВІДХОДІВ З УТИЛІЗАЦІЄЮ ОСАДІВ У ДОБРИВА

Дослідження присвячене вирішенню проблеми вилучення фосфору зі стічних вод, що є надзвичайно актуальною у сучасних умовах зростання антропогенного навантаження на водні ресурси. Надмірне надходження фосфатів у природні водойми спричиняє інтенсивну евтрофікацію, погіршення якості води, зниження біорізноманіття та зростання витрат на водопідготовку. Одночасно фосфор належить до невідновлюваних корисних копалин, запаси яких поступово вичерпуються, що зумовлює економічну доцільність його повернення у виробничий цикл. Тому поєднання процесу очищення стічних вод із подальшим використанням вилучених фосфатів у виробництві добрив відповідає принципам сталого розвитку та циркулярної економіки.

У роботі представлено результати експериментального дослідження ефективності вилучення фосфатів із модельних розчинів у динамічних і періодичних умовах із використанням адсорбентів різної природи. У динамічних випробуваннях найвищу ефективність продемонстрував природний цеоліт, який забезпечив ступінь очищення 94,5%, що значно перевищує показники активованого вугілля, глауконіту та подрібненої шкарлупи волоського горіха (67,75 – 76,5%). У періодичних умовах найшвидше вилучення фосфатів (98 % за 2 години) спостерігалось для активованого вугілля, однак цеоліт проявив кращий баланс між ефективністю очищення та можливістю подальшої екологічно безпечної утилізації.

Особливу увагу приділено перспективам повторного використання насичених адсорбентів. Показано, що цеолітові осади можуть слугувати доступною сировиною для виробництва мінеральних і органо-мінеральних добрив пролонгованої дії, які покращують структуру ґрунту, підвищують утримання вологи та зменшують втрати поживних елементів. На основі отриманих даних запропоновано удосконалену технологічну схему очищення міських стічних вод із впровадженням стадії доочищення у контактних відстійниках із дозуванням цеоліту (1 г/дм³, 60 хв контакту). Запропоноване рішення забезпечує не лише значне зниження концентрації фосфатів, але й створює умови для інтеграції процесів очищення та ресурсного відновлення, що є важливою перевагою для сучасних очисних споруд.

Ключові слова: стічні води, адсорбція цеоліт, фосфати, добрива, пролонгована дія, технологічна схема.

A. V. IVANCHENKO

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Chemical and Biological Technologies
Dniprovsky State Technical University
ORCID: 0000-0002-1404-7278

V. V. VORONOV

Postgraduate Student at the Department of Chemical and Biological Technologies
Dniprovsky State Technical University
ORCID: 0009-0004-3717-01-31

YU. O. SEREDA

Master at the Department of Chemical and Biological Technologies
Dniprovsky State Technical University
ORCID: 0009-0000-4272-03-97

ADSORPTION EXTRACTION OF PHOSPHORUS FROM LIQUID WASTE WITH UTILIZATION OF SEDIMENTS IN FERTILIZER

The study is dedicated to solving the problem of removing phosphorus from wastewater, which is extremely relevant in modern conditions of increasing anthropogenic load on water resources. Excessive input of phosphates into natural reservoirs causes intensive eutrophication, deterioration of water quality, reduction of biodiversity and increase in costs for water treatment. At the same time, phosphorus belongs to non-renewable minerals, the reserves of which are gradually depleted, which determines the economic feasibility of its return to the production cycle. Therefore, the combination of the wastewater treatment process with the subsequent use of extracted phosphates in the production of fertilizers corresponds to the principles of sustainable development and circular economy.

The paper presents the results of an experimental study of the efficiency of phosphate removal from model solutions in dynamic and periodic conditions using adsorbents of various nature. In dynamic tests, the highest efficiency was demonstrated by natural zeolite, which provided a degree of purification of 94.5%, which significantly exceeds the indicators of activated carbon, glauconite and crushed walnut shell (67.75–76.5%). In batch conditions, the fastest phosphate removal (98% in 2 hours) was observed for activated carbon, but the zeolite showed a better balance between cleaning efficiency and the possibility of further environmentally safe disposal.

Special attention is paid to the prospects of reuse of saturated adsorbents. It is shown that zeolite sediments can serve as an available raw material for the production of long-acting mineral and organo-mineral fertilizers that improve soil structure, increase moisture retention, and reduce the loss of nutrients. On the basis of the obtained data, an improved technological scheme of urban wastewater treatment with the introduction of the post-treatment stage in contact settling tanks with zeolite dosage (1 g/dm³, 60 min of contact) is proposed. The proposed solution provides not only a significant reduction in the concentration of phosphates, but also creates conditions for the integration of cleaning processes and resource recovery, which is an important advantage for modern treatment facilities.

Key words: wastewater, zeolite adsorption, phosphates, fertilizers, prolonged action, technological scheme.

Постановка проблеми

Актуальність адсорбційного вилучення фосфору та утилізації осадів у добрива визначається екологічними, економічними та ресурсними чинниками. Цей підхід є частиною стратегії циркулярної економіки, що спрямована на відновлення цінних ресурсів із відходів. Основна екологічна причина – це запобігання евтрофікації (надмірному заростанню) водойм. Фосфор є ключовим лімітуючим біогенним елементом, який, потрапляючи зі стічними водами та сільськогосподарським стоком у річки та озера, спричиняє інтенсивний ріст водоростей і ціанобактерій. Це призводить до зниження концентрації розчиненого кисню, загибелі риби та інших водних організмів. Адсорбція є перспективним методом вилучення фосфору, особливо у порівнянні з традиційним хімічним осадженням, оскільки вона ефективна навіть при низьких концентраціях фосфору у стічних водах. Метод адсорбції передбачає використання різноманітних доступних та недорогих адсорбентів, часто виготовлених з відходів (модифіковані глини, сорбенти з рослинної сировини).

Разом з цим, фосфор – це незамінний елемент для сільського господарства, адже є складовою добрив. Його світові запаси обмежені та невідновлювані. Утилізація фосфоровмісних осадів (зокрема, осаду стічних вод або матеріалів, насичених фосфором після адсорбції) дозволяє повернути цей цінний елемент назад у ґрунт як добриво. Це сприяє продовольчій безпеці та зменшує залежність від імпорту фосфатних порід. Адсорбційне вилучення фосфору у поєднанні з переробкою отриманих осадів у добрива є життєво важливою ланкою у забезпеченні екологічної стійкості (захист водойм) та економічної безпеки (збереження фосфорного ресурсу).

Утилізація цих осадів шляхом перетворення на добрива дозволяє: зменшити площі для полігонів і мулових майданчиків, отримати додаткову економічну вигоду від реалізації добрив, покращити структуру ґрунту, оскільки осад часто містить органічні речовини та мікроелементи. Осади, отримані після очищення, особливо після адсорбційного вилучення фосфору, можуть бути перероблені в органічно-мінеральні добрива. Це дозволяє забезпечити сільське господарство дешевими добривами, сприяти біологічно виправданому використанню відходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Фосфор є мінеральною поживною речовиною, необхідною для росту рослин і, таким чином, для сучасного сільського господарства [1, 2]. Ця хімічна сполука має багато природних та антропогенних джерел походження і вважається основним забруднювачем, оскільки може накопичуватися і досягати небезпечних концентрацій у водних об'єктах внаслідок гірничодобувної, промислової та сільськогосподарської діяльності, а також скидів стічних вод [3]. Коли це відбувається, може бути індукована евтрофікація, яка характеризується надмірним ростом водоростей, особливо синьо-зелених (тобто ціанобактерій). Деякі автори вказують, що концентрація фосфатів

у водосховищі на рівні $0,02 \text{ мг/дм}^3$ є достатньою для стимуляції росту водоростей. Евтрофікація може призвести до різкого зменшення розчиненого кисню за відсутності сонячного світла і, як наслідок, до депопуляції водних видів, створення "мертвих зон". Уникнення цього явища є вкрай важливим, оскільки відомо, що відновлення водойми, яка зазнала евтрофікації, є дуже повільним процесом. Хоча нітроген також відіграє певну роль, в літературі вказується, що фосфор є головним винуватцем евтрофікації [4, 5], що виправдовує увагу до видалення фосфатів з води.

Глинисті матеріали широко вивчаються як адсорбенти для багатьох забруднювачів, завдяки таким цікавим властивостям, як поширеність, реакційна здатність і велика питома поверхня. Однак, що стосується поглинання фосфатів, кількість досліджень досить обмежена і практично обмежується бентонітом (або монтморилонітом) і палигорськітом. При кислотній обробці палигорськіту перед застосування для вилучення фосфатів відбувається розчинення катіонів і кремнію, що збільшує площу поверхні, пористість і адсорбцію фосфору [6].

Бентоніти для вилучення фосфору були модифіковані різними гідроксидами металів. Запропоновано також модифікувати бентоніт за допомогою $\text{Mg}(\text{OH})_2$, що призвело до утворення кластерів між шарами, покращення площі поверхні [7].

Поглинання фосфатів глинистими матеріалами відбувається відносно швидко, причому адсорбційна рівновага досягається за 1–2 год для модифікованих палигорськіту і монтморилоніту [6,7].

Запропоновано нові способи покращення якості річкової води шляхом сорбційного вилучення надлишку фосфат-іонів із стічних вод прибережних населених пунктів. Запропоновано вилучати фосфат-іони за допомогою природного сорбенту бентоніту, активованого мікрохвилями у різні способи. Мікрохвильова активація цього сорбенту збільшує коефіцієнт вилучення фосфат-іонів із стічних вод у декілька разів, порівняно з нативним бентонітом [8].

Цеоліти – це алюмосилікатні мінерали, які зазвичай використовуються як адсорбенти. вони діють на видалення Р з високоміцних реальних стічних вод шляхом адсорбції допомогою іонного обміну, викликаючи вивільнення іонів кальцію, які осаджуються разом з фосфатом [9, 10]. Кілька досліджень показують, що можна підвищити здатність цеолітів до поглинання фосфатів шляхом включення металів.

Перспективним вбачається продовження експериментальних досліджень із застосуванням цеоліту для вилучення фосфат-аніонів з модельних та реальних стічних вод. Одним із невирішених питань застосування даного методу очищення є утилізація осадів після сорбції фосфатів.

Раніше нами розроблено технологію одержання орґано-мінеральних добрив з продуктів очистки міських стічних вод від фосфатів. У якості сировини для одержання добрив застосовувався торф, насичений фосфатами, кальцій фосфат, ферум(III) фосфат, активний мул міських очисних споруд [11]. Вміст поживних речовин у одержаних добривах на суху речовину, мас.% не менше: С – 70–90; $N_{\text{зар.}}$ – 1,6; P_2O_5 – 3,8–20; K_2O – 0,1.

Основна ідея проведення даного дослідження є застосування відпрацьованих осадів після вилучення сполук фосфору для одержання добрив пролонгованої дії. Адже відомо, що мінеральні та орґано-мінеральні добрива, що містять у своєму складі цеоліт, мають високу міцність до стирання, низьку запиленість, екологічно безпечні, багаторічні та мають пролонговану дію і покращені агрохімічні властивості [12].

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження – встановити особливості процесу вилучення фосфатів з модельних розчинів з безпечною утилізацією цеолітових осадів у добрива.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для проведення експериментальних досліджень у якості вихідного модельного розчину використали розчин натрій гідрофосфату концентрацією 100 мг/дм^3 . Для проведення експериментального дослідження зібрано наступну лабораторну установку (рис. 1).

Світлина лабораторної установки показана на рис. 2.

У якості природних сорбентів випробовували сорбент на основі шкарлупи волоського горіха, цеоліт та активоване вугілля(проба порівняння).

Модельний розчин фосфору пропущено через сорбенти у лабораторному реакторі-адсорбері, наприкінці експерименту визначено концентрацію неорґанічних фосфатів у пробах після очищення.

В наступному експерименті Природний алюмосилікат глауконіт застосовано з використанням верхньоприводної мішалки при інтенсивності перемішування 700 обертів за хвилину, витраті сорбенту 1 г/дм^3 тривалістю адсорбції 1 година.

Для визначення концентрації неорґанічних фосфатів у стічній воді використано фотометричний метод (відновлення аскорбіновою кислотою), при застосуванні такої апаратури: колориметр, червоний світлофільтр (при довжині хвилі 690 нм), кювети товщиною шару 5 см . Виміри поводитися із застосуванням колориметра фотоелектричного концентраційного КФК–2.

Гістограма результатів адсорбційного вилучення сполук фосфору з модельних розчинів показана на рис. 3.

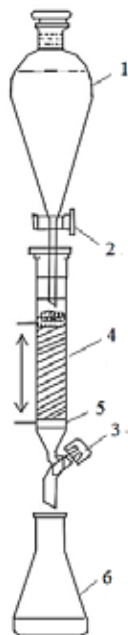


Рис. 1. Лабораторна установка вилучення сполук фосфору з рідких відходів природними алюмосилікатами

1 – воронка з модельним розчином; 2,3 – кран; 4 – шар адсорбенту; 5 – скляний фільтр; 6 – приймач для збору очищеного розчину



Рис. 2. Світлина лабораторної установки вилучення сполук фосфору з рідких відходів природними алюмосилікатами

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що при використанні природного адсорбенту на основі горіхової шкарлупи вміст фосфатів знижено з 100 мг/дм³ до 32,25 мг/ дм³, активованого вугілля до 23,5 мг/дм³, глауконіту до 25,75 мг/ дм³, цеоліту до 5,5 мг/ дм³.

Таким чином, найвищу ефективність у динамічних умовах з використанням адсорбційної колонок проявив цеоліт. Ефективність очищення цеолітом становила $E_{ц} = \frac{100 - 5,5}{100} * 100 = 94,5\%$, $E_{глаук.} = \frac{100 - 25,75}{100} * 100 = 74,25\%$, $E_{акт.вуг.} = \frac{100 - 23,5}{100} * 100 = 76,5\%$, $E_{горіх.} = \frac{100 - 32,25}{100} * 100 = 67,75\%$.

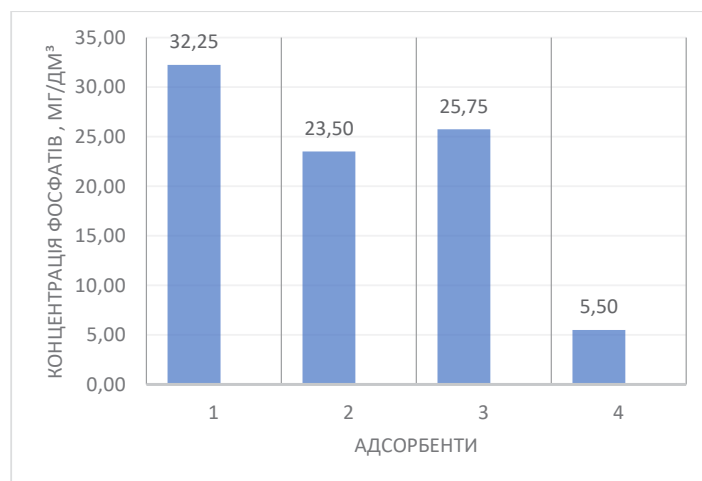


Рис. 3. Результати адсорбційного вилучення сполук фосфору з модельних розчинів вихідною концентрацією 100 мг/дм³

1 – шкарлупа волоського горіха; 2 – вугілля активоване; 3 – глауконіт; 4 – цеоліт

Наступні експериментальні дослідження проведено із використанням адсорбційного реактора з верхньоприводною мішалкою, світлина якого зображена на рис. 4.



Рис. 4. Світлина лабораторного реактору з верхньоприводною мішалкою

На рис. 5 представлена залежність залишкового вмісту фосфору від тривалості контакту адсорбентів з модельним розчином.

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що при використанні цеоліту концентрація фосфору знижується з 25 мг/дм³ до 5 мг/дм³ через годину та до 3,25 мг/дм³ через 2 години експерименту; при використанні глауконіту концентрація фосфору знижується з 25 мг/дм³ до 4,5 мг/дм³ через годину та до 3,75 мг/дм³ через 2 години експерименту.

Також виявлено, що при використанні активованого вугілля концентрація фосфору знижується з 25 мг/дм³ до 3 мг/дм³ через годину та до 0,5 мг/дм³ через 2 години експерименту. Встановлено, що класичний адсорбент активоване вугілля виявив найвищі показники очищення. Ефективність очистки становить: $E_{\text{вуг}} = \frac{25 - 0,5}{25} \cdot 100\% = 98\%$.

Із алюмосилікатів (цеоліт та глауконіт), що використовувались в експерименті – найбільш ефективним виявився цеоліт: $E_{\text{цеол}} = \frac{25 - 3,25}{25} \cdot 100\% = 87\%$.

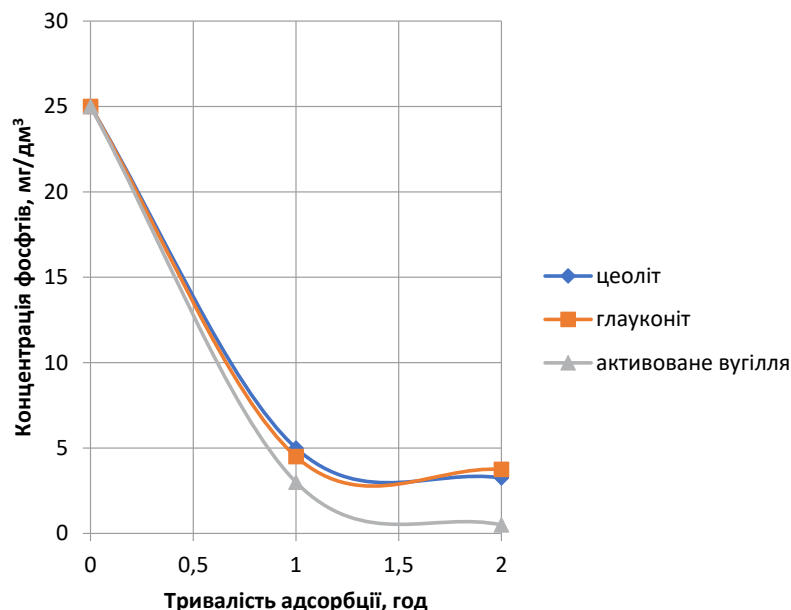


Рис. 5. Залежність залишкового вмісту фосфору від тривалості контакту адсорбентів з модельним розчином

Таким чином, природний цеоліт можна рекомендувати для промислового впровадження на очисних спорудах з підвищеним вмістом фосфору. На основі експериментальних досліджень розроблено технологічну схему адсорбційної очистки міських стічних вод від фосфатів, яка представлена на рис. 6.

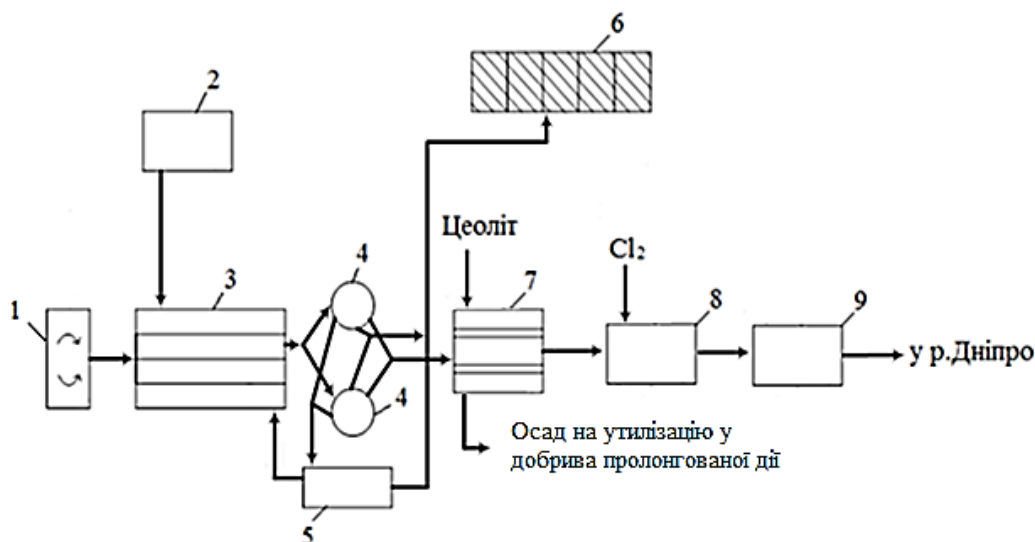


Рис. 6. Технологічна схема адсорбційної очистки міських стічних вод від фосфатів

1 – змішувач побутових і промислових стоків; 2 – компресорна; 3 – аеротенки; 4 – вторинні радіальні відстійники; 5 – мулова насосна станція; 6 – мулові майданчики; 7 – контактні відстійники; 8 – хлораторна; 9 – ставки накопичувачі

Процес очищення відбувається наступним чином. Освітлені стічні води після первинних відстійників прямують у змішувач промислових і побутових вод 1. Час змішування складає 10 хв. У змішувачі 1 стічні води, що пройшли механічне очищення, усереднюються за складом і концентрацією забруднень. Після змішування стічні води поступають на біологічне очищення в аеротенки 3, куди подається повітря з компресорної 2 для підтримання життєдіяльності мікроорганізмів активного мулу. Аеротенки повинні забезпечувати необхідний ефект окислювання і мінералізації органічних речовин, що містяться в стічних водах. Після біологічного очищення, суміш стічних вод та активного мулу по трубопроводу відводиться у вторинні радіальні відстійники 4. Активний мул, що осів

з вторинних відстійників 4, відділяється в мулову насосну станцію 5, з якої повертається в аеротенки. Зі станції 5 за допомогою насоса надлишковий активний мулу перекачується на майданчики 6. Далі освітлені стічні води поступають на доочищення від фосфатів у контактні відстійники 7, у які зверху подається цеоліт в якості адсорбенту витратою 1 г/дм³, тривалість контактування стоків та цеоліту складає 60 хвилин. Осад після адсорбційної очистки міських стічних вод від фосфатів рекомендовано використовувати у якості сировини для одержання мінеральних та органо-мінеральних добрив пролонгованої дії. Після доочищення від фосфатів стоки перекачуються до хлораторної 8, де знезаражуються і через ставки-накопичувачі 9 поступають у природну водойму.

Висновки

Актуальність дослідження обумовлена екологічними (запобігання евтрофікації водойм) та економічно-ресурсними (відновлення обмежених запасів фосфору) чинниками, що відповідає принципам циркулярної економіки. Адсорбційне вилучення фосфору зі стічних вод із подальшою утилізацією осадів у добрива є важливою ланкою у забезпеченні екологічної стійкості та продовольчої безпеки. Експериментальні дослідження адсорбційного вилучення фосфатів із модельних розчинів концентрацією 100 мг/дм³ у динамічних умовах (адсорбційні колонки) показали найвищу ефективність при застосуванні цеоліту (94,5%). Природні матеріали (шкарлупа волоського горіха, глауконіт) і активоване вугілля мали нижчі показники очищення (67,75 % – 76,5 %). В умовах періодичної дії (реактор з мішалкою, вихідна концентрація політанта $C_{\text{вих}} = 25$ мг/дм³) найвищу ефективність вилучення фосфору спостерігали при застосуванні активованого вугілля (98 %) за 2 години, тоді як серед алюмосилікатів цеоліт проявив кращий результат (87%) порівняно з глауконітом. З огляду на необхідність безпечної та економічно вигідної утилізації, природний цеоліт рекомендовано для промислового впровадження на очисних спорудах з підвищеним вмістом фосфору, оскільки цеолітовмісні органо-мінеральні добрива мають пролонговану дію та покращені агрохімічні властивості. Дослідження підтверджують можливість використання відпрацьованих цеолітових осадів як сировини для одержання мінеральних та органо-мінеральних добрив пролонгованої дії. Запропоновано та обґрунтовано технологічну схему очищення міських стічних вод, що включає доочищення після біологічної обробки у контактних відстійниках з додаванням цеоліту (1 г/дм³ при 60 хв контакту) як адсорбенту. Ця схема дозволяє не лише ефективно знижувати концентрацію фосфатів у стічних водах, а й інтегрувати процес відновлення ресурсу фосфору шляхом переробки насиченого осаду у добрива.

Список використаної літератури

1. Vance C. P., Uhde-Stone C., Allan D. L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New phytologist*. 2003. V. 157. №. 3. P. 423–447. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x>
2. De-Bashan L. E., Bashan Y. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997–2003). *Water research*. 2004. V. 38. №. 19. P. 4222–4246. DOI:10.1016/j.watres.2004.07.014
3. Loganathan P. et al. Removal and recovery of phosphate from water using sorption. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2014. V. 44. №. 8. P. 847–907. <https://doi.org/10.1080/10643389.2012.741311>
4. Smith V. H., Schindler D. W. Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in ecology & evolution*. 2009. V. 24. №. 4. P. 201–207. DOI:10.1016/j.tree.2008.11.009
5. Schindler D. W. et al. Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success. *Environmental Science & Technology*. 2016. V. 50. №. 17. P. 8923–8929. DOI: 10.1021/acs.est.6b02204
6. Ye H. et al. Adsorption of phosphate from aqueous solution onto modified palygorskites. *Separation and Purification Technology*. 2006. V. 50. №. 3. P. 283–290.
7. El Bouraie M., Masoud A.A. Adsorption of phosphate ions from aqueous solution by modified bentonite with magnesium hydroxide $\text{Mg}(\text{OH})_2$. *Applied Clay Science*. 2017. V. 140. P. 157–164. DOI: 10.1016/j.clay.2017.01.021
8. Бойчук Б.Я. Порівняння ефективності різних способів мікрохвильової активації бентоніту у процесі очищення ним стічних вод від надлишку фосфатів. *Науковий вісник ХНТУ України*. 2022. т. 32, № 2. С. 45–49. <https://doi.org/10.36930/40320207>
9. Wan C. et al. Simultaneous recovery of nitrogen and phosphorus from sludge fermentation liquid by zeolite adsorption: Mechanism and application. *Separation and Purification Technology*. 2017. V. 180. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.02.031>
10. Mitrogiannis D. et al. Phosphate recovery from real fresh urine by $\text{Ca}(\text{OH})_2$ treated natural zeolite. *Chemical Engineering Journal*. 2018. V. 347. P. 618–630. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.04.102>
11. Іванченко А.В. Одержання органо-мінеральних добрив з продуктів очистки міських стічних вод від фосфатів : дис...канд. техн. наук : 05.17.01 / Дніпродзержин. держ. техн. ун-т. Дніпродзержинськ, 2010. 181 с.
12. Патент України № 158220 Спосіб протиточно-ступінчатої адсорбційної очистки стічних вод від неорганічних фосфатів та поверхнево-активних речовин Іванченко А.В., Гуляєв В.М., Воронов В.В., Сокол О.Д. Сорока О.В. МПК B01D 15/02; власник Дніпровський державний технічний університет. № у 2024 03018; заявл. 07.06.2024, опубл. 09.01.2025, бюл. № 2.

References

1. Vance C. P., Uhde-Stone C., Allan D. L. (2003). Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 157(3), 423–447.
2. De-Bashan L. E., Bashan, Y. (2004). Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997–2003). *Water Research*, 38(19), 4222–4246.
3. Loganathan P., et al. (2014). Removal and recovery of phosphate from water using sorption. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(8), 847–907.
4. Smith V. H., Schindler, D. W. (2009). Eutrophication science: where do we go from here? *Trends in Ecology Evolution*, 24(4), 201–207.
5. Schindler, D. W., et al. (2016). Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success. *Environmental Science & Technology*, 50(17), 8923–8929.
6. Ye, H., et al. (2006). Adsorption of phosphate from aqueous solution onto modified palygorskites. *Separation and Purification Technology*, 50(3), 283–290.
7. El Bouraie, M., Masoud, A. A. (2017). Adsorption of phosphate ions from aqueous solution by modified bentonite with magnesium hydroxide $Mg(OH)_2$. *Applied Clay Science*, 140, 157–164.
8. Boichuk, B. Ya. (2022). Porivniannia efektyvnosti riznykh sposobiv mikrokhvylovoi aktyvatsii bentonitu u protsesi ochyshchennia nym stichnykh vod vid nadlyshku fosfativ [Comparison of the efficiency of different microwave activation methods of bentonite in wastewater purification from excess phosphates]. *Naukovyi Visnyk NLTU Ukrainy*, 32(2), 45–49. [in Ukrainian].
9. Wan, C., et al. (2017). Simultaneous recovery of nitrogen and phosphorus from sludge fermentation liquid by zeolite adsorption: Mechanism and application. *Separation and Purification Technology*, 180, 1–12.
10. Mitrogiannis D., et al. (2018). Phosphate recovery from real fresh urine by $Ca(OH)_2$ treated natural zeolite. *Chemical Engineering Journal*, 347, 618–630.
11. Ivanchenko A.V. (2010). Oderzhannia organo-mineralnykh dobryv z produktiv ochystky misykykh stichnykh vod vid fosfativ [Production of organo-mineral fertilizers from the products of purification of municipal wastewater from phosphates] (Dissertation of a candidate of technical sciences 05.17.01). Dniprodzerzhynsk State Technical University. 181 p. [in Ukrainian].
12. Ivanchenko A.V., Hulciaiev V.M., Voronov V.V., Sokol, O. D., Soroka O.V. (2025). Sposib protytochno-stupinchastoi adsorbtsiinoi ochystky stichnykh vod vid neorganichnykh fosfativ ta poverkhnevo-aktyvnykh rehovyn [Counter-current stepwise adsorption treatment of wastewater from inorganic phosphates and surfactants]. Patent of Ukraine No. 158220, u2024 03018. Filed 07.06.2024, published 09.01.2025. [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

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

О. М. РОЇК

кандидат фармацевтичних наук, доцент,
доцент кафедри промислової фармації
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 000-0002-5988-6577

Ю. В. КУНІЦЬКА

здобувач вищої освіти кафедри промислової фармації
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0009-0006-4917-5399

О. В. ПЕТРЕНКО

здобувач вищої освіти кафедри промислової фармації
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0009-0008-1948-2528

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЛІПІДНОЇ МАСКИ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНОГО ВОЛОССЯ

Проблема відновлення пошкодженого волосся є критичною через агресивний вплив хімічних, термічних та УФ-чинників, що спричиняє втрату природних ліпідів, зневоднення, ламкість та пористість. Сучасний попит сфокусований на екологічних ліпідних масках, які імітують природний захисний бар'єр волосся.

Ключовим механізмом відновлення є заміщення втрачених ліпідів та протеїнів. Дослідження підтверджують, що рослинні олії з середньоланцюговими жирними кислотами проникають у кортекс, зменшуючи пористість та мінімізуючи втрату протеїнів.

Особливий інтерес становлять інноваційні біоміметичні інгредієнти – низькомолекулярні гідролізовані протеїни та ліпідні комплекси (HMA Silky, Sunflohair™) для підвищення абсорбції.

Мета дослідження – опрацювання технології виготовлення ефективної та стабільної ліпідної маски для інтенсивного відновлення пошкодженого волосся.

Розроблено багатокомпонентну ліпідну маску з активними інгредієнтами: рослинним ліпосомальним комплексом HMA Silky, фосfolіпідним комплексом Sunflohair™, гідролізатом кератину, d-пантенолом, олією солодкокого мигдалю та олією Ши у формі емульсії типу "олія у воді" (O/B), що забезпечує легкість нанесення та зволожуючий сенсорний профіль. Емульсійна основа стабілізована за рахунок синергічної системи катіонних емульгаторів рослинного походження: Varisoft BTMS PLT MB та Genamin® CTAC. Катіонна природа емульгаторів забезпечує підвищену афінність до негативно зарядженого пошкодженого волосся.

Запропоновано технологію виготовлення емульсійної ліпідної маски, з визначенням критичних стадій та технологічних контрольних параметрів для стабілізації O/B – емульсії та готового продукту. Встановлено органолептичні та фізико-хімічні показники якості розробленої ліпідної маски для відновлення та догляду за пошкодженим волоссям, а саме pH $4,4 \pm 0,2$; однорідна кремоподібна консистенція, висока колоїдна та термо- стабільності.

Розроблена ліпідна маска з інноваційними ліпідними комплексами та гідролізатом кератину є безпечним та ефективним продуктом для відновлення пошкодженого волосся.

Ключові слова: ліпідна маска, технологія, обладнання, технологічна схема, косметична продукція, догляд за волоссям, пошкоджене волосся.

O. V. ISHCENKO

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 Technologies and Design
ORCID: 0000-0002-0691-8563

O. M. ROIK

Candidate of Pharmaceutical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Industrial Pharmacy
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 000-0002-5988-6577

YU. V. KUNITSKA

Higher Education Student at the Department of Industrial Pharmacy
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0009-0006-4917-5399

O. V. PETRENKO

Postgraduate Student at the Department of Industrial Pharmacy
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0009-0008-1948-2528

DEVELOPMENT OF A LIPID MASK TECHNOLOGY FOR RESTORING DAMAGED HAIR

The problem of restoring damaged hair is critical due to the aggressive influence of chemical, thermal, and UV factors, which cause loss of natural lipids, dehydration, brittleness, and porosity. Current demand is focused on eco-friendly lipid masks that mimic the hair's natural protective barrier.

The key mechanism of recovery is the replacement of lost lipids and proteins. Studies confirm that vegetable oils with medium-chain fatty acids penetrate the cortex, reducing porosity and minimising protein loss.

Of particular interest are innovative biomimetic ingredients – low molecular weight hydrolysed proteins and lipid complexes (HMA Silky, Sunflohair™) to enhance absorption.

The aim of the study is to develop a technology for the production of an effective and stable lipid mask for intensive restoration of damaged hair.

A multi-component lipid mask with active ingredients has been developed: HMA Silky plant liposomal complex, Sunflohair™ phospholipid complex, keratin hydrolysate, d-panthenol, sweet almond oil and shea oil in the form of an oil-in-water (O/W) emulsion, which ensures ease of application and a moisturising sensory profile. The emulsion base is stabilised by a synergistic system of plant-based cationic emulsifiers: Varisoft BTMS PLT MB and Genamin® CTAC. The cationic nature of the emulsifiers provides increased affinity for negatively charged damaged hair.

A technology for the production of an emulsion lipid mask is proposed, with the determination of critical stages and technological control parameters for stabilising the O/W emulsion and the finished product.

The organoleptic and physicochemical quality indicators of the developed lipid mask for the restoration and care of damaged hair have been established, namely pH 4.4 ± 0.2 ; homogeneous creamy consistency, high colloidal and thermal stability.

The developed lipid mask with innovative lipid complexes and keratin hydrolysate is a safe and effective product for restoring damaged hair.

Key words: lipid mask, technology, equipment, technological scheme, cosmetic products, hair care, damaged hair.

Постановка проблеми

Волосся не лише формує зовнішню привабливість, а й виступає своєрідним індикатором загального стану здоров'я людини.

Сучасні засоби для догляду за волоссям, створені на основі екологічно безпечних та відновлюваних рослинних інгредієнтів, дедалі частіше сприймаються як частина здорового способу життя. На відміну від традиційної продукції з переважно синтетичними компонентами, вони користуються стійким і зростаючим попитом у глобальному масштабі.

Негативний вплив косметичної продукції з компонентами синтетичного походження на здоров'я людини та навколишнє середовище доведено багатьма дослідженнями останніх років в галузі розробки косметики для догляду за волоссям.

Для збереження цілісності та підтримання здорового стану волоссяного стрижня ключову роль відіграють ліпіди. Ліпідні компоненти кутикули, кортексу та медули формують природний бар'єр, який захищає волосся від дії агресивних хімічних агентів та негативних факторів довкілля. Вони беруть участь у регуляції еластичності, рівня зволоження, міцності та пористості волосся, визначаючи його фізико-механічні властивості та стійкість до пошкоджень [1-3].

Зокрема, 18-метилейкозанова кислота (18-МЕА), кераміди та холестерин знаходяться на поверхні кутикули та між її клітинами, утворюючи ліпідний бар'єр, захищають волосся від трансепідермальної втрати води, зовнішніх пошкоджень (УФ-випромінювання, механічного тертя, хімічних впливів), надають волоссям гладкості, блиску та м'якості, скріплюють лусочки кутикули, запобігаючи їх підняттю та розшаруванню. Останнє є причиною ламкості та посічених кінчиків. Ліпіди кортексу допомагають також підтримувати структурну цілісність кератину та еластичність волосся [4,5].

Деградація ліпідного шару волоссяного стрижня значно прискорюється під впливом агресивних косметичних процедур, таких як знебарвлення, фарбування, хімічна завивка, випрямлення, а також внаслідок дії поверхнево-активних речовин. Втрата ліпідів також інтенсифікується під дією ультрафіолетового випромінювання та у процесі хронологічного старіння. Сукупність цих чинників зумовлює зниження зволоженості, підвищення ламкості та загальне погіршення структурно-механічних властивостей волосся [4,6,7].

Останнім часом особливу увагу привертають технології створення ліпідних масок для волосся, збагачених комплексом поживних речовин, серед яких важливе місце займають інгредієнти, що відтворюють властивості природних ліпідів здорового волосся. На відміну від традиційних кондиціонерів та масок, ліпідні маски для волосся проникають глибше у волоссяний стрижень, забезпечуючи довготривалий ефект. Ліпіди у складі таких масок здатні відновлювати ліпідний бар'єр пошкодженого волосся, захищати його від втрати вологи, покращувати еластичність. Завдяки цьому ліпідні маски є ключовими косметичними продуктами у ефективному відновленні та догляді за пошкодженим волоссям.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Згідно з аналізом останніх наукових досліджень і публікацій встановлено, що вивчення впливу та механізмів дії негативних факторів на волосся ведуться поряд із активним пошуком більш стійких і екологічно прийнятних інгредієнтів для відновлення пошкодженого волосся.

В публікації [8] наведені результати досліджень, які представляють інтерес для розробки рецептур різноманітних косметичних засобів по догляду за волоссям (від фарб до масок), зокрема доведено вплив характеру поверхні твердих частинок (дзета-потенціал, розмір, функціональна група, склад та гідрофобність) на спорідненість до волосся та осадження цих частинок на здоровому та пошкодженому/знебарвленому волоссі. Також виявлено сильнішу спорідненість частинок до здорового, ніж до пошкодженого (знебарвленого) волосся. Встановлена закономірність пояснюється зменшенням кількості місць взаємодії «частинка–волосся» через пошкодження та видалення зовнішнього ліпідного шару.

Багато досліджень останніх років присвячено вивченню впливу шкідливих факторів навколишнього середовища, таких як ультрафіолетові промені та тверді частинки, на пористу природу волосся та виявленню раніше невідомих аспектів цих процесів. Було встановлено, що тверді частинки з навколишнього середовища мають синергетичний ефект з ультрафіолетовим випромінюванням, посилюючи пористість волосся, тобто забруднення твердими частинками не викликає пористості волосся; але воно збільшує швидкість зростання пористості волосся під впливом ультрафіолетового випромінювання [9]. Виснаження озонового шару та забруднення повітря, зокрема твердими частинками, посилюють пошкодження волосся. Цьому можна запобігти, підтримуючи здоров'я волосся шляхом застосування косметичних засобів з інгредієнтами, що зменшують пористість пошкодженого волосся.

До таких інгредієнтів відносяться олії рослинного походження. Рослинні олії являють собою складні суміші тригліцеридів насичених і ненасичених жирних кислот з різними жирними кислотами та дигліцерідами. Склад та фізико-хімічні властивості суміші цих природних речовин суттєво впливають на позитивний ефект застосування рослинних олій у засобах для догляду за волоссям, зокрема на пористість волосся. Дослідження показали, що комплексне використання арахісової олії та олії розторопші сприяє відновленню текстури пошкодженого волосся, зокрема підвищує його міцність, блиск і знижує пористість [10, 11].

Пористість волосся підвищується з віком та внаслідок фарбування, хімічної завивки й використання засобів із агресивними ПАР, які вимивають протеїни та ліпіди.

Під час проведення досліджень авторами встановлено, що кокосова олія чинить відновлювальну дію, зменшує пошкодження кортексу волосся, спричинені ПАР під час миття, та знижує його пористість [12]. Її зменшення пов'язано з блокуванням молекулами олії шляхів дифузії в ендокутікулі та матриксі кортикальних клітин, обмежуючи взаємодію протеїнів з ПАР, що призводить до зниження втрати волоссям протеїнів і кольору, збільшенню гідрофобності

волосся і на його поверхні, і в кортексі. Молекули олії утворюють щільний дифузійний бар'єр у матриксі, комплекси клітинних мембран та ендокутиккульних ділянках волосся, які є основними шляхами дифузії з волосся.

Захист пошкодженого волосся рослинними оліями відбувається двома шляхами – поверхневим покриттям та проникненням у структуру волосся. І хоча існують літературні джерела, що стосуються проникнення окремих натуральних олій у волосся, до останніх років бракувало даних, які б пояснювали вплив довжини ланцюга жирних кислот на проникнення у волосся, зокрема після окислювального пошкодження. Дослідженнями встановлено, що середньоланцюгові жирні кислоти проникають та захищають волосся значно краще, ніж довголанцюгові [13].

Рослинні олії з широким спектром тригліцеридів, а саме: кокосова (coconut oil), олія камелії (Camellia oleifera seed oil), сафлорова олія (Safflower seed oil) забезпечують міцність та м'якість волосся завдяки їх проникненню в структуру волосся [14]. Проникнення окремих чистих тригліцеридів, що входять до складу цих олій було підтверджено для всіх довжин ланцюгів та ступенів ненасиченості, причому вища проникність була продемонстрована для коротших ланцюгів та ненасичених жирних кислот. Також встановлено проникнення та взаємодія досліджуваних олій з жирними кислотами (18-метил-ейкозановою, пальмітиною (C16:0) та олеїною (C18:1)) модельного клітинного мембранного комплексу (КМК). Передбачається, що ці олії запобігають утворенню та/або поширенню дефектів у КМК, що призводить до ламкості волосся.

Використання рослинних олій у масках для догляду за волоссям значно зросло за останні роки. Завдяки проникненню олій всередину волосся підвищується опір дифузійним шляхам проникнення хімічних речовин, пори в структурі пошкодженого волосся поступово заповнюються, відновлюється гідрофобність волосся. Багато рослинних олій містять незамінні жирні кислоти, вітаміни та антиоксиданти, які зміцнюють волосся, покращують утримання вологи, захищають від негативного впливу навколишнього середовища. Такі олії, як арганова, кокосова та олія жожоба, допомагають відновити пошкоджене волосся, зменшити пухнастість і підвищити його еластичність. Дослідження показали, що взаємодія між різними оліями та волоссям, в першу чергу, залежить від спорідненості молекул до клітинного мембранного комплексу волосся (олії діють як клей між клітинами, що зв'язують кутикулу та кору разом), а також від структури та розміру молекул. [15 – 17].

Косметичні засоби для догляду за волоссям, крім рослинних олій містять також інші активні інгредієнти, серед яких протеїни, які відіграють важливу роль у компенсації втрати цих речовин під час пошкодження волосся. Відома велика кількість доказів здатності протеїнів змінювати такі властивості волосся, як сила, форма, об'єм, колір, гладкість, блиск і вологість. Перелік найважливіших протеїнів, що використовуються в косметичних засобах для догляду за волоссям, включає протеїни колагену, еластину, фібронектину, кератину, молока, шовкового протеїну тощо [10,18]. Однак слід зазначити, що традиційні маски з нативними (немодифікованими) протеїнами забезпечують лише полегшення, але нездатні запобігти пошкодженню та тривалому відновленню пошкодженого волосся внаслідок обмеженої проникності в структуру волосся.

Сьогодні в масках для волосся широко використовують інноваційні біоміметичні інгредієнти – гідролізати протеїнів, зокрема колагену та кератину [19-21]. Гідролізовані протеїни складаються з низки поліпептидних молекул. Низькомолекулярні гідролізовані протеїни здатні проникати всередину кутикули волосини для забезпечення структурної цілісності та міцності; або в самі зовнішні шари епідермісу для миттєвого розгладження, відновлення шкіри голови та захисту від трансепідермальної втрати води. Високомолекулярні гідролізовані протеїни є добре сумісними зі шкірою та волоссям, заповнюючи «прогалини», де є пошкодження ззовні волоссяного стовбура. Заповнюючи ці прогалини, вони відновлюють структурну цілісність, міцність, гнучкість і навіть можуть згладжувати пошкоджену кутикулу та заповнювати деякі прогалини в посічених кінчиках. Згідно з результатами досліджень [20] гідролізований кератин молекулярної маси вище 3000 Da проявляє ще здатність до емульгування та загушення, що розширює його галузь застосування.

Підвищення проникності кератину досягають також інкапсуляцією кератину у катіонні ліпосоми, що підвищує його стабільність, біодоступність та проникність в кортекс волосся [22].

Застосування нано- та біотехнологій, генної інженерії та біоінформатики сприяло появі нових високоефективних косметичних інгредієнтів рослинного походження, які етично отримані та екологічно чисті. До таких інгредієнтів відносять ліпідні комплекси, насичені ліпідами, що легко проникають у волосся. Одним з них є ліпідний комплекс 369LAB Lipid Bond, який отримано за патентованою технологією Lipid Bond [23]. Технологія Lipid Bond дозволяє отримувати нано-, мікроемульсії тригліцеридів рослинної олії для імітації природних ліпідів волосся, покращуючи абсорбцію та біодоступність тригліцеридів. Ліпідний комплекс 369LAB Lipid Bond усуває хімічні та екологічні пошкодження, відновлює ліпідні зв'язки у волоссі, регенерує структуру волосся, покращує його міцність та підтримує його здорову пружність протягом тривалого часу [24].

Отже, аналіз та узагальнення даних останніх досліджень та публікацій

свідчить про актуальність напрямку наукових досліджень щодо розробки технології ліпідних масок на основі багатокомпонентних косметичних композицій з ліпідними комплексами, гідролізатами протеїнів, рослинними оліями, яке спрямовано на розширення асортименту ефективних і безпечних вітчизняних косметичних продуктів для відновлення пошкодженого волосся.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є опрацювання технології ліпідної маски для відновлення та догляду за пошкодженим волоссям.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для розробки ефективної та якісної ліпідної маски необхідно цілеспрямовано підходити до вибору та комбінації активних інгредієнтів, які здатні забезпечити відновлення пошкодженого волосся, а також сприяти оптимальному рівню зволоження та живлення волосся та шкіри голови.

Формування складу ліпідної маски та опрацювання технології її виготовлення проведено з урахуванням сучасних досягнень в галузі технологій виготовлення емульсійних косметичних масок [19] із застосуванням інноваційних косметичних інгредієнтів для відновлення та захисту волосся від впливу негативних факторів [25], організації технологічного процесу та вибору технологічного обладнання [26].

Емульсійна основа ліпідної маски розроблена відповідно до класифікації INCI (International Nomenclature of Cosmetic Ingredients) і містить наступні інгредієнти: Aqua purificata, Varisoft BTMS PLT MB (INCI: Behentrimonium methosulfat, Cetearyl alcohol), Vegarol-1618TA (INCI: cetearyl alcohol), віск бджолиний (Permulgin 0160, INCI: beeswax), алантоїн (INCI: allantoin), натрієва сіль етилендіамінтетраоцетової кислоти (EDTA -2 NA, INCI: disodium EDTA), гліцерин (INCI: glycerin), ксантанова камедь (Blooming gum OC, INCI: xanthan gum).

Було також використано допоміжні компоненти: Genamin® CTAC (INCI: Cetrimonium chloride, Aqua), Euxyl PE 9010 (INCI: phenoxyethanol, ethylhexylglycerin), Blooming Q 22 (INCI: polyquaternium-22, sodium benzoate, aqua), Silsoft® CLX-E (INCI: dipropylene glycol, aqua, polysilicone-29), Salcare® Super 7 AT1 (INCI: polyquaternium-7, aqua), Tanzaliza fragrance 490096, харчова 80% молочна кислота (INCI: lactic acid 80%).

В якості активних інгредієнтів використовували HMA Silky (INCI: aqua, propylene glycol, hamamelis, virginiana leaf extract, behentrimonium chloride, helianthus annuus seed oil, ppg-15 stearyl ether, polyquaternium-68, hydroxypropyl guar, phenyl trimethicone, potassium sorbate, sodium benzoate, ceramide NP, daucus carota sativa root extract, daucus carota sativa seed oil, beta-carotene, phenoxyethanol, glycerin, caprylyl glycol, isopropyl alcohol, phenylpropanol, butyl hydroxytoluene, glyceryl caprylate), Sunflohair™ (INCI: phospholipids, helianthus annuus seed oil), гідролізат кератину (Hydrolyzate of keratin proteins, INCI: aqua, glycerin, hydrolyzed keratin, sodium benzoate), d-пантенол (D-panthenol 75 w, INCI: aqua, d-panthenol), олія солодконого мигдалю (Sweet almond oil BP73, INCI: prunus amygdalus dulcis oil), олія Ши (Shea butter, INCI: butyrospermum parkii).

Активний інгредієнт HMA Silky – це рослинний ліпосомальний комплекс, який містить у складі ліпосоми наступні активні компоненти: екстракт листя гамамелісу (hamamelis, virginiana leaf extract), олію насіння соняшника однорічного (helianthus annuus seed oil), керамід III, вітаміни F і P. Цей ліпосомальний комплекс, завдяки глибокому проникненню, забезпечує стійкість волосся до ламкості. допомагає утримувати вологу, забезпечує блиск і шовковистість сухому або пошкодженому волосся [27].

Sunflohair™ – фосфоліпідний комплекс, складається з фосфоліпідів соняшнику та олії. Його специфічний склад має сильну спорідненість до волосся, завдяки чому він легко проникає в волоссяний стрижень. Проникаючи глибоко у волосся, Sunflohair™ здатний відновлювати ліпідний матрикс, тим самим відновлюючи пошкоджені структури зсередини. Антиоксидантна активність Sunflohair захищає волоссяний стрижень від зовнішніх пошкоджень [28].

Гідролізат кератину (Hydrolyzate of keratin proteins) використовується для розгладження і зволоження пошкодженої кутикули волосся. Він заповнює тріщини і усуває пухнастість, пов'язану з сухістю. Він допомагає заповнити прогалини по всьому волоссяному стрижню, включаючи його три шари, відомі як кутикула, кортекс і медула. Заповнення цих мікроскопічних прогалин розщепленим протеїном сприяє зміцненню структури волосся, тим самим покращуючи його загальну еластичність, мінімізує руйнівний вплив сонячного опромінення, термічної укладки, хімічних процедур. Він є також антистатиком що знижує статичну електрику за рахунок нейтралізації електричного заряду на поверхні волосся. Він кондиціонує волосся і робить його легким для розчісування, м'яким і блискучим та/або надає об'єму, легкості та блиску. [20, 22].

D-пантенол (d-panthenol 75 W) – активний протизапальний засіб. Цей провітамін забезпечує покращення зовнішнього вигляду шкіри, волосся та нігтів, оскільки легко проникає у клітини, де метаболізується до пантотенової кислоти (вітаміну B5). Під час догляду за волоссям, пантенол створює найтоншу плівку навколо нього, що захищає його від агресивного впливу навколишнього середовища. Також, зміцнює волоссяні фолікули, що необхідно при випаданні волосся [29].

Олія солодконого мигдалю (Sweet almond oil BP73) утворює захисний бар'єр для запобігання втраті вологи, зберігаючи шкіру голови та волосся м'якими, еластичними та здоровими, а також надає кондиціюючий ефект, забезпечує блиск і слухняність волосся, не обтяжуючи його [30].

Олія Ши (Shea butter) складається з тригліцеридів (близько 80%) і жирних кислот (близько 17%) [31]. Завдяки великому вмісту тригліцеридів олія Ши глибоко проникає в структуру волосся, зволожуючи та живлячи його зсередини, надаючи блиск і м'якість, сприяє зміцненню волоссяних фолікулів, запобігаючи ламкості та посіченим

кінчикам, створює захисний шар, що оберігає волосся від термічного впливу при укладанні і негативних факторів навколишнього середовища.

Маски для волосся найчастіше створюються у вигляді двофазних дисперсних систем – емульсій. Емульгування дозволяє поєднувати ефективні олійні та водні компоненти в єдину композицію і полегшує доставку активних інгредієнтів в пошкоджене волосся. Емульсійні основи масок для волосся складаються з олійної фази та водної фази. Залежно від того, яка фаза диспергована в іншій, ці основи класифікують або як емульсії води в олії (В/О), або як емульсії олія у воді (О/В). Вибір дисперсної фази сильно впливає на форму та сенсорні характеристики маски для волосся. Емульсії типу О/В забезпечують легке, немастке й зволене відчуття, тоді як В/О характеризуються більш щільною, маслянистою сенсорикою для шкіри та волосся [32].

Відповідно до загальноприйнятих технологічних прийомів створення стабільних емульсій, для побудови О/В-емульсійної матриці маски застосовано систему, що складається з двох катіонних емульгаторів рослинного генезису – Varisoft BTMS PLT MB та Genamin® СТАС. Ці сполуки, які відрізняються за хімічною природою, були інтегровані для взаємодоповнення функціональних властивостей та забезпечення довготривалої стабільності системи.

Varisoft BTMS PLT MB містить четвертинну амонієву сіль – метосульфат бехентримонію, яка стабілізована цетоарилловим спиртом, та є одночасно вискоєфективним емульгатором і кондиціонером. Метосульфат бехентримонію найчастіше використовується як антистатик, кондиціонер, пом'якшувач, зволожувач у засобах для догляду за волоссям. Його також використовується як підвищувач в'язкості та стабілізатор емульсій на рослинній основі [33].

Genamin® СТАС являє собою 30% водний розчин хлориду цетримонію. Цетримонію хлориду – це четвертинна амонієва сполука рослинного походження, використовується як катіонний емульгатор, ПАР, антимікробний агент, кондиціонер. Відомо, що пошкоджене волосся на поверхні має негативно заряджені ділянки. Оскільки волокна волосся в основному складаються з відмерлих клітин, то пошкоджена кутикула волосся не має біологічного способу відновлення. Для боротьби цією проблемою застосовуються кондиціонери, які тимчасово покривають і заповнюють пошкоджені частини кутикули. Катіонні ПАР в засобах для волосся взаємодіють з аніонними ділянками та осідають на волоссі. На відміну від інших ПАР Genamin® СТАС поглинається негативно зарядженою поверхнею волосся, не залишаючи видимої плівки, виявляє пом'якшувальну та антистатичну дію. Забезпечує чудове сухе та вологе розчісування, високу щільність, чудове зчеплення, блиск, об'єм та об'ємність волосся. Слід відмітити також, що негативний заряд пошкодженого волосся підвищує спорідненість катіонної ПАР до кератинових волокон, завдяки чому догляд за волоссям має ще більший ефект [34].

Як гідрофобну фазу нами обрано цетеариловий спирт (Vegarol-1618TA) та віск бджолиний (Permulin 0160).

Permulin 0160 – це суміш натурального бджолиного воску, що зберігає властивості чистого бджолиного воску. Його можна використовувати в широкому спектрі косметичних продуктах догляду за волоссям. Перевагами Permulin 0160 емульгуюча здатність, відносно низька температура плавлення і висока оклюзійна здатність. В емульсіях він функціонує як регулятор консистенції та (спів)емульгатор і сприяє покращенню відчуття шкіри, пом'якшенню [35].

Vegarol-1618TA – це суміш стеарилового та цетилового спиртів, що зв'язується з волоссям, змашує його та полегшує розчісування, а також має зволожуючі властивості [36].

Як консервант обрано Euxyl PE 9010, який містить антимікробний інгредієнт феноксіетанол і етилгексилгліцерин. Euxyl PE 9010 має широкий, збалансований спектр дії проти бактерій, дріжджів, плісняви та грибків. Переваги запатентованої стабілізованої суміші включають високу ефективність широкого спектру дії. Містить 90% активної речовини, а етилгексилгліцерин (10%) додається для модифікації міжфазного натягу на клітинній мембрані мікроорганізмів, покращуючи таким чином консервуючу активність феноксіетанолу. Перевагою Euxyl PE 9010 є також стійкість до гідролізу, температури та pH [37].

В якості антистатика обрано Blooming Q-22, який містить водорозчинний сополімер акрилової кислоти та діалілдиметиламоній хлориду полікватерніум-22. Полікватерніум-22 забезпечує дві ключові переваги в косметичі: антистатичну дію та утворення легкої плівки. Його позитивний заряд нейтралізує статичну електрику на волоссі, а гнучка плівка розгладжує кутикулу, утримує вологу та забезпечує м'яку фіксацію. Інгредієнт вперше з'явився наприкінці 1970-х років, коли хіміки шукали безпечніші та довговічніші альтернативи застарілим кондиціонерам, які обтяжували волосся. Змінивши співвідношення двох вихідних мономерів, вони знайшли формулу, яка забезпечувала м'який дотик без важкості та липкості [38].

До складу рецептури ліпідної маски включено також включено антистатик Polyquaternium 7 (Salcare super 7 AT1 aqua), який дуже добре розплутує волосся і забезпечує ковзання для легшого розчісування вологим гребінцем. Крім того, він додає м'якість та блиск сухому волосся. Полікватерніум-7, який скорочено називають PQ-7, є катіонним поліелектролітом, який широко використовується в засобах для догляду за волоссям завдяки своїм антистатичним властивостям і здатності утворювати плівки. У догляді за волоссям надає волоссям еластичності та блиску після висихання [39].

Кондиціонер для догляду за волоссям Silsoft™ CLX-E допомагає захистити волосся від пошкоджень і відновити пошкоджене волосся до здорового стану, який можна порівняти з якістю волосся біля коренів. Цей продукт рекомендується для розгладжування та відновлення волосся, захисту кольору, термозахисту [40].

Алантаїн покращує еластичність і м'якість волосся, надаючи йому легкого блиску, тому його часто додають до кондиціонерів і спреїв для волосся. Будучи кератолітиком, алантаїн допомагає зволожувати волосся та шкіру голови, м'якість кератину, що дозволяє шкірі голови та волосся утримувати вологу. Кератин – надзвичайно твердий білок, тому його розщеплення або пом'якшення дозволяє утримувати вологу у волоссі та шкірі голови [41].

EDTA-2 NA (натрієва сіль етилендіамінтетраоцетової кислот – це потужний хелатуючий (комплексоутворювальний) агент, який використовується для зв'язування та зниження реакційної здатності іонів металів кальцію, магнію, заліза, які можуть бути присутні в косметичному продукті внаслідок використання води неналежної якості, чим підвищує його стабільність.

До складу ліпідної маски в якості регулятора pH обрано молочну кислоту. Відомо, що молочна кислота (lactic acid) широко застосовується в доглядових засобах завдяки тому, що ефективно регулює загальний pH косметичних композицій, допомагаючи відновити природний кислотно-лужний баланс шкіри голови. Це зменшує такі проблеми, як свербіж, почервоніння та лупа, одночасно покращуючи захист шкіри голови від зовнішніх подразників. Молочна кислота покращує структуру кутикули волосся, зменшуючи пухнастість та роблячи волосся більш гладким і слухняним. Для хімічно обробленого або пошкодженого волосся молочна кислота в засобах для волосся допомагає запечатати кутикулу, утримувати вологу та поживні речовини, а також покращити загальну силу та блиск волосся [42].

Ксантанова камедь (Bloomig gum OC) – це аніонний високомолекулярний полісахарид, який використовується як стабілізатор і модифікатор в'язкості в системах на водній основі. Це натуральний продукт, нетоксичний і не подразнюючий. Його можна використовувати в поєднанні з іншими гелеутворювачами, загусниками та стабілізаторами для покращення текстури, стабільності та зовнішнього вигляду косметичного продукту. Висока в'язкість ксантанової камеді при низькій швидкості зсуву ефективно стабілізує маски, креми, які є найчастіше емульсіями олій у воді. Ксантанова камедь підтримує стабільність емульсій в широкому діапазоні температур і pH [43].

Гліцерин обрано як розчинник, зволожувач, стабілізатор. Він є нетоксичною та антиалергенною речовиною. Він добре змішується з багатьма косметичними інгредієнтами та широко використовується в косметичній промисловості завдяки своїм численним корисним властивостям. Гліцерин – сполука природного походження, що робить його універсальним інгредієнтом. Хімічна структура гліцерину складається з тривуглецевого ланцюга з гідроксильними групами, які визначають його унікальні гідрофільні характеристики – він притягує та утримує вологу з навколишнього середовища. У рецептурах кремоподібних масок на емульсійній основі гліцерин слугує ключовим компонентом для стабілізації емульсій типу «О/В». Він допомагає безперешкодно змішувати водну та масляну фази, забезпечуючи стабільну текстуру, сприяє стабільності рецептури, подовжуючи термін придатності. Крім того, гліцерин діє як розчинник у косметичних рецептурах, чим підвищує біодоступність активних інгредієнтів [44].

Склад ліпідної маски розроблено на підставі загальновідомих наукових даних і рекомендованих концентрацій для кожного з обраних компонентів (Табл. 1).

При розробці складу поряд з визначенням активних і допоміжних інгредієнтів особлива увага була приділена встановленню їх оптимального співвідношення. Співвідношення компонентів підібрані таким чином, щоб забезпечити необхідну відновлювальну та зволожуючу дію, а також належні споживчі властивості: естетичність (зовнішній вигляд, колір, запах), зручність нанесення, безпечність, стабільність при зберіганні.

Під час опрацювання складу й технології ліпідної маски встановлено її органолептичні та фізико-хімічні показники якості. Зовнішній вигляд, колір і запах маски визначали візуально в прозорій ємності при температурі $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Запах визначали органолептично при температурі $(20 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Показник pH визначали потенціометричним методом відповідно до ДСТУ 2207.1-93 «Засоби миючі синтетичні і речовини поверхнево-активні. Методи визначення концентрації водневих іонів» на pH-метрі SevenCompact S210 (Mettler Toledo, Switzerland). Визначення колоїдної стабільності (для емульсійних систем) та термостабільності виконано за ДСТУ ISO/TR 18811:2019 Косметика. Настанови щодо визначення стабільності косметичних продуктів (ISO/TR 18811:2018, IDT).

За результатами проведених органолептичних, фізико-хімічних досліджень ліпідної маски встановлено специфікаційні характеристики розробленої маски (Табл. 2).

Технологія приготування емульсійної ліпідної маски визначає стабільність та ефективність готового продукту. При її розробці було враховано фізико-хімічні властивості вихідних компонентів при формуванні фаз, напівпродуктів та готової розробленої маски, а також температурний режим ведення технологічного процесу на кожній стадії.

Таблиця 1

Рецептура розробленої ліпідної маски

№	Торгівельна назва компоненту	INCI	Вміст, %
1	Вода очищена	Aqua purificata	81,08
2	Varisoft BTMS PLT MB	Behentrimonium ethosulfate, Cetearyl alcohol	8,00
3	Vegarol-1618TA	Cetearyl alcohol	4,00
4	Genamin® CTAC	Cetrimonium chloride, Aqua	2,00
5	Euxyl PE 9010	Phenoxyethanol, ethylhexylglycerin	1,00
6	Blooming Q 22	Polyquaternium-22, sodium benzoate, aqua	0,80
7	Silsoft® CLX-E	Dipropylene glycol, aqua, polysilicone-29	0,70
8	Tanzaliza fragrance 490096	Benzyl alcohol, benzyl salicylate, coumarin, geranyl acetate, hexamethylindanopyran (galaxolide), hydroxycitronellal, limonene, pinene, rose ketones, tetramethylacetyloctahydro naphthalenes, vanillin	0,50
9	Permulin 0160	Beeswax	0,40
10	Salcare® Super 7 AT1	Polyquaternium-7, aqua	0,37
11	HMA Silky	Aqua, propylene glycol, hamamelis, virginiana leaf extract, behentrimonium chloride, helianthus annuus seed oil, ppg-15 stearyl ether, polyquaternium-68, hydroxypropyl guar, phenyl trimethicone, potassium sorbate, sodium benzoate, ceramide NP, daucus carota sativa root extract, daucus carota sativa seed oil, beta-carotene, phenoxyethanol, glycerin, caprylyl glycol, isopropyl alcohol, phenylpropanol, butyl hydroxytoluene, glyceryl caprylate	0,20
12	Sunflohair™	Phospholipids, helianthus annuus seed oil	0,15
13	D-panthenol 75 w	Aqua, d-panthenol	0,10
14	Hydrolyzate of keratin proteins	Aqua, glycerin, hydrolyzed keratin, sodium benzoate	0,10
15	Алантаїн	Allantoin	0,10
16	EDTA -2 NA	Disodium EDTA	0,10
17	Lactic acid 80% food grade	Lactic acid (80%)	0,10 (до pH 4,2-4,7)
18	Sweet almond oil BP73,	Prunus amygdalus dulcis oi	0,10
19	Shea butter	Butyrospermum parkii	0,10
20	Гліцерин	Glycerin	0,10
21	Blooming gum OC	Xanthan gum	0,05

Таблиця 2

Органолептичні та фізико-хімічні показники модельного зразка ліпідної маски

Назва показника	Характеристика і норма	Методи контролю
Зовнішній вигляд	однорідна кремоподібна маса	ДСТУ 5009:2008
Колір	властивий кольору сировини	ДСТУ 5009:2008
Запах	властивий запаху сировини	ДСТУ 5009:2008
Водневий показник (pH)	4,4± 0,2	ДСТУ 2207.1-93
колоїдна стабільність	стабільний	ДСТУ ISO/TR 18811:2019
Термостабільність	стабільний	ДСТУ ISO/TR 18811:2019

Розроблена ліпідна маска являє собою емульсію типу олія у воді (O/B) та готується шляхом диспергування олійної фази у водній в присутності емульгаторів, які забезпечують стабільність системи «дисперсна фаза – дисперсійне середовище». Для запобігання розшарування фаз та стабільності готової ліпідної маски в процесі її приготування ведеться контроль температури та швидкість змішування.

Технологічний процес промислового виробництва ліпідної маски включає наступні стадії:

Стадія 1. Підготовка вихідної сировини.

На електронних вагах у відповідні ємності відважують компоненти ліпідної маски згідно з рецептурою – вода очищена, Varisoft BTMS PLT MB, Vegarol-1618TA, Genamin® CTAC, Euxyl PE 9010, Blooming Q 22, Silsoft® CLX-E, Tanzaliza fragrance 490096, Permulin 0160, Salcare® Super 7 AT1, HMA Silky, Sunflohair™, D-panthenol 75 w, Hydrolyzate of keratin proteins, алантаїн, EDTA -2 NA, Lactic acid 80% food grade, Sweet almond oil BP73, Shea butter, Glycerin, Blooming gum OC.

У виробничому приміщенні класу чистоти D в зоні зважування підтримується температура не вище 25 °C, щоб запобігти окисненню активних інгредієнтів. Після зважування всі інгредієнти в закритих ємностях маркують відповідно до партії та рецептурного номера на транспортують на наступну стадію 2– отримання маски (виробниче приміщення класу чистоти C).

Стадія 2. Отримання маски

Операція 2.1. Приготування олійної фази

У реактор з електронагрівом та мішалкою завантажують Varisoft BTMS PLT MB, Vegarol-1618TA (цетеариловий спирт), Permulin 0160 (віск бджолиний). Суміш нагрівають до (75–80) °С до повного розплавлення та утворення однорідної маси. У процесі виробництва контролюють температуру, однорідність маси.

Операція 2.2. Приготування суспензії ксантанової камеді

У ємність з мішалкою поміщають Blooming gum OC (ксантанову камедь) і при перемішуванні поступово додають гліцерин до отримання однорідної пастоподібної суспензії. Контроль – однорідність маси (візуально).

Операція 2.3. Приготування водної фази.

У реактор з паровою сорочкою та мішалкою додають воду очищену, нагрівають до (85–90) °С. Потім послідовно при включеній мішалці додають алантоїн, EDTA-2 NA, суспензію ксантанової камеді. Процес проводять при інтенсивному перемішуванні до отримання гомогенної водної фази. Контролюють температуру, гомогенність, швидкість обертання мішалки (1800 об/хв).

Операція 2.4. Приготування маски

У водну фазу поступово вводять жирову фазу при температурі (80–85) °С та підключеному вакуумі. Емульгування проводиться при високій швидкості мішалки. Після утворення первинної емульсії відключають вакуум, зменшують швидкість обертання мішалки до (25–30) об/хв. Охолоджують до (30–35) °С і вводять консервант EUXYL PE9010, Genamin® CTAC, Blooming Q 22, Silsoft® CLX-E, Salcare® Super 7 AT1, Tanzaliza fragrance 490096, d-пантенол (D-panthenol 75 w) та активні інгредієнти: HMA Silky, Sunflohair™, Hydrolyzate of keratin proteins, Sweet almond oil BP73, Shea butter. Контролюють рівень pH (молочна кислота), температуру, режим і час перемішування, однорідність емульсійної ліпідної маски.

Стадія 3. Фасування і пакування

Ліпідну маску фасують у полімерні флакони, які герметично закривають, укладають разом з інструкцією у картонну упаковку. Контролюють об'єм заповнення, герметичність, цілісність упаковки.

Готова продукція проходить контроль якості за органолептичними, фізико-хімічними та мікробіологічними показниками.

Технологія приготування цієї ліпідної маски відрізняється тим, що ксантанова камедь не вводиться безпосередньо в водну фазу. Відомо, що її диспергування у воді відбувається досить важко. Запропонована попередня обробка камеді гліцерином.

Камедь швидко та легко утворює пастоподібну суспензію, яка добре диспергується у водній фазі. Застосування цього технологічного прийому дозволяє покращити рівномірний розподіл камеді у водній фазі, сприяє отриманню стабільної емульсії О/В та оптимізує текстуру кінцевого косметичного продукту.

З метою реалізації опрацьованої технології виготовлення ліпідної маски в промислових умовах розроблена технологічна схема її виробництва (рис. 1) та визначені вимоги до організації технологічного процесу та обладнання.

Приймаючи до уваги зростаючі вимоги до якості та безпеки косметичної продукції впровадження у виробництво опрацьованої ліпідної маски вимагає дотримання правил Належної виробничої практики (GMP) до організації технологічного процесу, приміщень, системи вентиляції та кондиціювання та обладнання [26].

Зокрема, виробничі приміщення повинні бути спроектовані, побудовані і використовуватися таким чином, щоб забезпечувати захист продукту та поточність технологічного процесу; дозволяти ефективне прибирання, санітарну обробку, та мінімізувати ризик перехресної контамінації продукції, сировини та пакувальних матеріалів.

В свою чергу, технологічне обладнання, що може бути застосовано на критичних для якості стадіях процесу виготовлення ліпідної маски, за експлуатаційними характеристиками повинно відповідати функціональному призначенню (параметри та способи ведення технологічного процесу). Для недопущення перехресної контамінації, накопичення пилу або бруду і взагалі будь-яких несприятливих чинників для якості продукції, обладнання за дизайном повинне забезпечувати зведення до мінімуму ризику помилок та можливість ефективного очищення й обслуговування. Матеріали, з яких виготовлені деталі та вузли технологічного обладнання, не повинні вступати в реакцію, виділяти або поглинати речовини/іони при контакті з компонентами ліпідної маски.

Висновки

1. Проведено теоретичне та експериментальне обґрунтування складу та технології виготовлення ліпідної маски для відновлення та догляду за пошкодженим волоссям з активними інгредієнтами: рослинним ліпосомальним комплексом HMA Silky, фосфоліпідним комплексом Sunflohair™, гідролізатом кератину, d-пантенолом, олією солодкокого мигдалю та олією Ши.

2. Встановлено органолептичні та фізико-хімічні показники якості розробленої ліпідної маски для відновлення та догляду за пошкодженим волоссям

3. На підставі фізико-хімічних властивостей інгредієнтів, що входять до складу крему, запропоновано технологічну схему виробництва ліпідної маски для відновлення та догляду за пошкодженим волоссям з визначенням критичних для якості параметрів в процесі виробництва та вимог до організації технологічного процесу та обладнання.

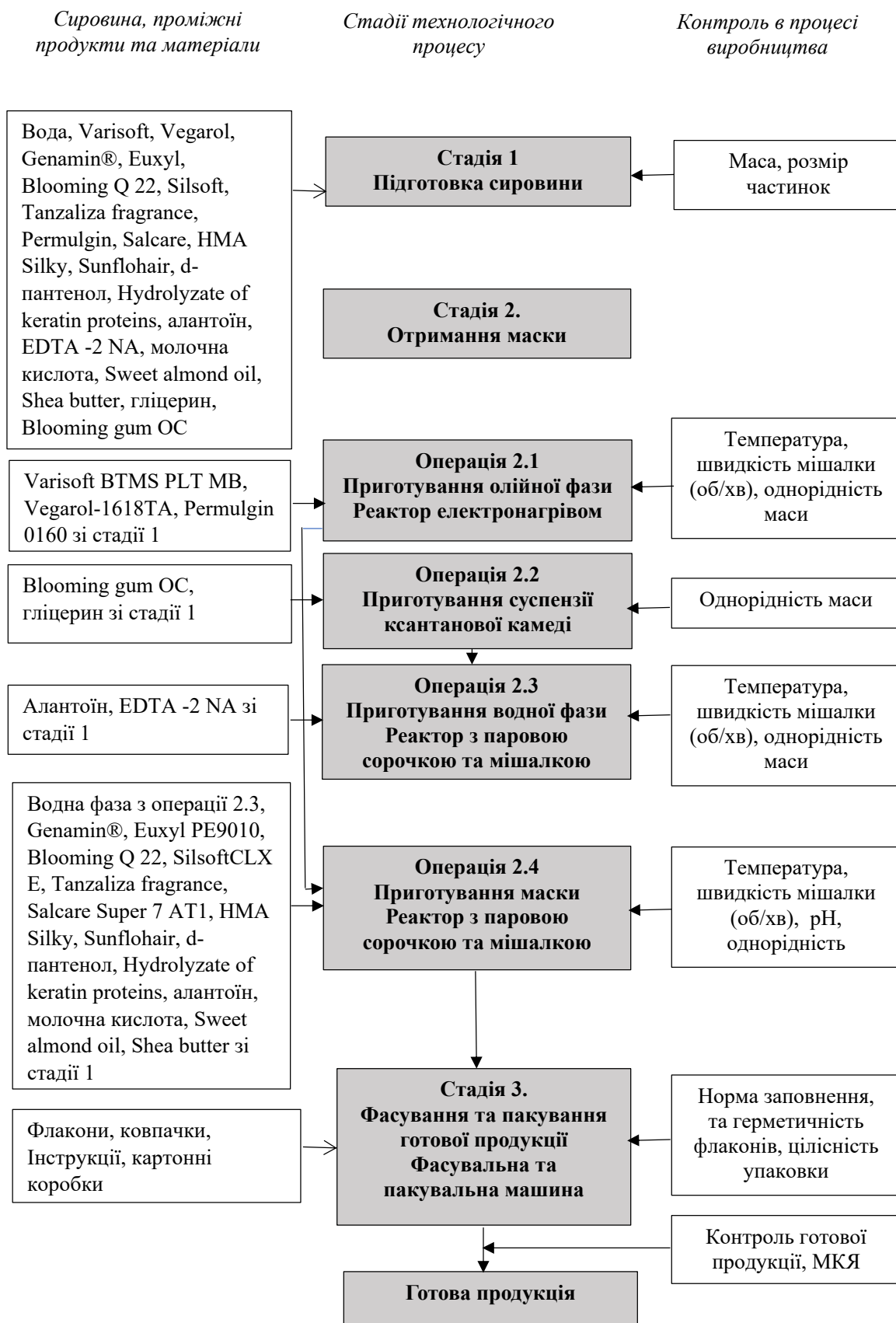


Рис. 1. Технологічна схема виробництва ліпідного крему

Список використаної літератури

1. A systematic review on the lipid composition of human hair / D. A. Csuka, et al. // *The International Journal of Dermatology*. 2023. Vol. 62, Issue 3. P. 404–415. URL: <https://doi.org/10.1111/ijd.16109>
2. Rogers G. E. Known and Unknown Features of Hair Cuticle Structure: A Brief Review. *Cosmetics*. 2019. Vol. 6, № 2. P. 32. URL: <https://doi.org/10.3390/cosmetics6020032>
3. Role of internal lipids in hair health / J. M. Marsh, et al. // *Journal of Cosmetic Science*. 2018. Vol. 69, № 5. P. 347–356. URL: <https://durham-repository.worktribe.com/output/1304338>
4. Coderch L. Hair lipid structure: Effect of surfactants // *Cosmetics*. 2023. Vol. 10, № 4. Art. 107. URL: <https://doi.org/10.3390/cosmetics10040107>
5. Tokunaga S., Tanamachi H., Ishikawa K. Degradation of hair surface: Importance of 18-MEA and epicuticle. // *Cosmetics*. 2019. Vol. 6, 31. URL: <https://doi.org/10.3390/cosmetics6020031>
6. Prevention of lipid loss from hair by surface and internal modification / S.-H. Song, J. H. Lim, et al. // *Scientific Reports*. – 2019. – Vol. 9, 9834. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46370-x>
7. Su Q., Zhou C., He C., Jiao Q. Research progress in composition, classification and influencing factors of hair. // *Asian Journal of Beauty and Cosmetology*. – 2023. Vol. 21, № 3. P. 503–516. URL: <https://doi.org/10.20402/ajb.c.2023.0001>
8. Influence of particle parameters on deposition onto healthy and damaged human hair / H. P. Tham, K. Y. Yip, et al. // *International Journal of Cosmetic Science*. 2025. Vol. 47. P. 58–72. URL: <https://doi.org/10.1111/ics.12994>
9. Effects of ultraviolet rays and particulate matter on hair porosity in damaged hair / S. J. Yang, H. J. Yu, J. Lee, et al. // *Journal of Cosmetic Dermatology*. 2024. Vol. 23. P. 3735–3739. URL: <https://doi.org/10.1111/jocd.16442>
10. Kim J.-S. K., Jeon Y. Effects of milk thistle oil on chemically damaged hair improvement. // *Journal of Korean Applied Science and Technology*. 2021. Vol. 38. P. 434–440. URL: <http://dx.doi.org/10.12925/jkocs.2021.38.2.434>
11. Ju-Sub K. Effect of peanut oil on hair texture improvement. // *Asian Journal of Beauty and Cosmetology*. 2020. Vol. 18. P. 331–340. URL: <https://doi.org/10.20402/ajbc.2020.0042>
12. Benefit of coconut-based hair oil via hair porosity quantification / V. Kaushik, A. Kumar, N. N. Gosvami, et al. // *International Journal of Cosmetic Science*. 2022. Vol. 44. P. 289–298. URL: <https://doi.org/10.1111/ics.12774>
13. Kim S., Ahn C. Determination of penetration and protection of fatty acids in bleached hair according to the fatty acid chain length and the application to understanding the protective effects of MCT oil and coconut oil. // *Fashion and Textiles*. 2023. Vol. 10, № 10. 24 p. URL: <https://doi.org/10.1186/s40691-023-00332-0>
14. Penetration of oils into hair / J. M. Marsh, S. Whitaker, T. Felts, et al. // *International Journal of Cosmetic Science*. 2024. Vol. 46, № 6. P. 905–917. URL: <https://doi.org/10.1111/ics.12978>
15. Srivastav A., Dandekar P., Jain R. Penetration study of oils and its formulations into the human hair using confocal microscopy. // *Journal of Cosmetic Dermatology*. 2019. Vol. 18, № 6. P. 1947–1954. URL: <https://doi.org/10.1111/jocd.12918>
16. Leite M. G. A., Campos P. M. B. G. M. Development and efficacy evaluation of hair care formulations containing vegetable oils and silicone. // *International Journal of Phytocosmetics and Natural Ingredients*. 2018. Vol. 5, № 1. P. 5–9. URL: <https://doi.org/10.15171/ijpni.2018.09>
17. Impact of hair damage on the penetration profile of coconut, avocado, and argan oils into Caucasian hair fibers / S. B. Lourenço, R. M. Gasparin, F. M. Tomaz., et al. // *Cosmetics*. 2024. Vol. 11, № 2. Art. 64. – URL: <https://doi.org/10.3390/cosmetics11020064>
18. Collagen-based materials in cosmetic applications: A review / A. Sionkowska, K. Adamiak, K. Musiał, M. Gadomska // *Materials*. 2020. Vol. 13, 4217. URL: <https://doi.org/10.3390/ma13194217>
19. Hair masks based on keratin and collagen / M. G. Albu-Kaya, M.-V. Ghica, C.-E. Dinu-Pîrvu, et al. // *Proceedings of the 9th International Conference on Advanced Materials and Systems (ICAMS 2022)*. 2022. P. 97–102. URL: <https://doi.org/10.24264/icams-2022.II.2>
20. Exploring the functional properties of hydrolyzed keratin: Filling the knowledge gap on surface active, emulsifying, and thickening properties / D. R. Perinelli, A. Cambriani, M. Cespi, et al. // *ACS Omega*. 2025. Vol. 10. P. 12224–12232. URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c10755>
21. Performance and mechanism of hydrolyzed keratin for hair photoaging prevention / J. Fan, L. Wu, J. Wang, X. Bian, C. Chen, K. Chang // *Molecules*. – 2025. Vol. 30, № 5. P. 1182. – URL: <https://doi.org/10.3390/molecules30051182>
22. Recovery and protection of photo-damaged hairs with keratin-encapsulated cationic liposomes / H.-T. D. Bui, S. J. Kim, et al. // *International Journal of Cosmetic Science*. 2025. Vol. 47, № 4. P. 730–739. URL: <https://doi.org/10.1111/ics.13080>
23. US20200346174A1. Process for production of nano – microemulsion system of plant oil triglycerides: U.S. Patent. – 2020.
24. Utilizing lipid bond technology with molecular lipid complex to provide lipid treatment for damaged hair / N. H. Lai, T. H. N. Dang, T. T. Nguyen, D. T. Q. Phan // *Dermatology Research and Practice*. 2025. Article ID 5385312. 9 p. URL: <https://doi.org/10.1155/drpr/5385312>

25. Технічний регламент на косметичну продукцію [Електронний ресурс]. URL: https://ucps.com.ua/build/files/technical_regulation_cosmetics.pdf.
26. ДСТУ EN ISO 22716:2015. Косметика. Належна виробнича практика (GMP). Настанови з належної виробничої практики (EN ISO 22716:2007, IDT). – К.: Мінекономрозвитку України, 2015. – 28 с.
27. Cosmetic Ingredients and Complexes Glossary [Електронний ресурс]. URL: <https://ci.guide/botanical-complexes/hma-silky>.
28. Lucas Meyer Cosmetics – Sunflohair [Електронний ресурс]. URL: <https://www.specialchem.com/cosmetics/product/lucas-meyer-cosmetics-clariant-sunflohair>.
29. Panthenol [Електронний ресурс]. URL: <https://www.specialchem.com/cosmetics/inci-ingredients/panthenol>.
30. Sweet Almond Oil BP73 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.specialchem.com/cosmetics/product/ascot-international-sweet-almond-oil-bp73>.
31. Burnett C. L. та ін. Safety assessment of Butyrospermum parkii (Shea)-derived ingredients as used in cosmetics // *International Journal of Toxicology*. 2024. Vol. 43, Issue 1_suppl. P. 82S–95S. URL: <https://doi.org/10.1177/10915818231224230>.
32. Emulsifiers: How to select the right grade for cosmetics? [Електронний ресурс]. URL: <https://www.specialchem.com/cosmetics/guide/emulsifiers>.
33. VARISOFT® BTMS Pellets MB [Електронний ресурс]. URL: https://personal-care.evonik.com/pim/fragment/personalcare/en/product/PR_52013381.
34. Genamin® CTAC [Електронний ресурс]. URL: <https://www.specialchem.com/cosmetics/product/clariant-genamin-ctac>.
35. Permulin 0160 [Електронний ресурс]. URL: <https://kosterkeunen.eu/e00160-permulgin-0160/>.
36. Cetearyl alcohol [Електронний ресурс]. URL: <https://www.specialchem.com/cosmetics/inci-ingredients/cetearyl-alcohol>.
37. Euxyl™ PE 9010 preservative [Електронний ресурс]. URL: <https://www.specialchem.com/cosmetics/product/ashland-euxyl-pe-9010-preservative>.
38. Polyquaternium-22: What is it, cosmetic uses, benefits & side effects [Електронний ресурс]. URL: <https://www.glooshi.com/polyquaternium-22/>.
39. Salcare® Super 7 AT 1 [Електронний ресурс]. URL: <https://www.specialchem.com/cosmetics/product/basf-salcare-super-7-at-1>.
40. Silsoft™ CLX-E Conditioning Agent [Електронний ресурс]. URL: <https://www.knowde.com/stores/momentive-performance-materials/products/silsoft-clx-e-conditioning-agent>.
41. Allantoin [Електронний ресурс]. URL: <https://www.specialchem.com/cosmetics/inci-ingredients/allantoin>.
42. Application of Lactic Acid in Hair Products: A New Option for Gentle Care and Hair Quality Improvement [Електронний ресурс]. URL: <https://www.xhlactics.com/application-of-lactic-acid-in-hair-products.html>.
43. Nsengiyumva E. M., Alexandridis P. Xanthan gum in aqueous solutions: Fundamentals and applications // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022. Vol. 216. P. 583–604. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.06.189>.
44. Safety assessment of glycerin as used in cosmetics // L. C. Becker, W. F. Bergfeld, D. V. Belsito // *International Journal of Toxicology*. 2019. Vol. 38, Issue 3 suppl. P. 6S–22S. – URL: <https://doi.org/10.1177/1091581819883820>

References

1. Csuka, D. A., Csuka, E. A., Juhász, M. L. W., Sharma, A. N., & Mesinkovska, N. A. (2023). A systematic review on the lipid composition of human hair. *International Journal of Dermatology*, 62(3), 404–415. <https://doi.org/10.1111/ijd.16109>
2. Rogers, G. E. (2019). Known and unknown features of hair cuticle structure: A brief review. *Cosmetics*, 6(2), 32. <https://doi.org/10.3390/cosmetics6020032>
3. Marsh, J. M., Whitaker, S., Felts, T., Shearouse, W., Vatter, M., Määttä, A., Thompson, M., & Hawkins, T. J. (2018). Role of internal lipids in hair health. *Journal of Cosmetic Science*, 69(5), 347–356. <https://durham-repository.worktribe.com/output/1304338>
4. Coderch, L., Alonso, C., García, M. T., Pérez, L., & Martí, M. (2023). Hair lipid structure: Effect of surfactants. *Cosmetics*, 10(4), 107. <https://doi.org/10.3390/cosmetics10040107>
5. Tokunaga, S., Tanamachi, H., & Ishikawa, K. (2019). Degradation of hair surface: Importance of 18-MEA and epicuticle. *Cosmetics*, 6(2), 31. <https://doi.org/10.3390/cosmetics6020031>
6. Song, S.-H., Lim, J. H., Son, S. K., Choi, J., Kang, N.-G., & Lee, S.-M. (2019). Prevention of lipid loss from hair by surface and internal modification. *Scientific Reports*, 9, 9834. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46370-x>
7. Su, Q., Zhou, C., He, C., & Jiao, Q. (2023). Research progress in composition, classification and influencing factors of hair. *Asian Journal of Beauty and Cosmetology*, 21(3), 503–516. <https://doi.org/10.20402/ajb.c.2023.0001>

8. Tham, H. P., Yip, K. Y., Aitipamula, S., Mothe, S. R., Zhao, W., Choong, P. S., Benetti, A. A., Gan, W. E., Leong, F. Y., Thoniyot, P., & Dawson, T. L. Jr. (2025). Influence of particle parameters on deposition onto healthy and damaged human hair. *International Journal of Cosmetic Science*, 47, 58–72. <https://doi.org/10.1111/ics.12994>
9. Yang, S. J., Yu, H. J., Lee, J., Hwang, S. J., Kang, N.-G., & Jeong, E.-T. (2024). Effects of ultraviolet rays and particulate matter on hair porosity in damaged hair. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 23, 3735–3739. <https://doi.org/10.1111/jocd.16442>
10. Kim, J.-S., & Jeon, Y. (2021). Effects of milk thistle oil on chemically damaged hair improvement. *Journal of the Korean Applied Science and Technology*, 38, 434–440. <http://dx.doi.org/10.12925/jkocs.2021.38.2.434>
11. Kim, J.-S. (2020). Effect of peanut oil on hair texture improvement. *Asian Journal of Beauty and Cosmetology*, 18, 331–340. <https://doi.org/10.20402/ajbc.2020.0042>
12. Kaushik, V., Kumar, A., Gosvami, N. N., Gode, V., Mhaskar, S., & Kamath, Y. (2022). Benefit of coconut-based hair oil via hair porosity quantification. *International Journal of Cosmetic Science*, 44, 289–298. <https://doi.org/10.1111/ics.12774>
13. Kim, S., & Ahn, C. (2023). Determination of penetration and protection of fatty acids in bleached hair according to the fatty acid chain length and the application to understanding the protective effects of MCT oil and coconut oil. *Fashion and Textiles*, 10(10), 24. <https://doi.org/10.1186/s40691-023-00332-0>
14. Marsh, J. M., Whitaker, S., Felts, T., Cowans, C., Gupta, S., Masirevic, S., Fang, R., Simmonds, M. S. J., Chen, G., & Jiang, H. (2024). Penetration of oils into hair. *International Journal of Cosmetic Science*, 46(6), 905–917. <https://doi.org/10.1111/ics.12978>
15. Srivastav, A., Dandekar, P., & Jain, R. (2019). Penetration study of oils and its formulations into the human hair using confocal microscopy. *Journal of Cosmetic Dermatology*, 18(6), 1947–1954. <https://doi.org/10.1111/jocd.12918>
16. Leite, M. G. A., & Campos, P. M. B. G. M. (2018). Development and efficacy evaluation of hair care formulations containing vegetable oils and silicone. *International Journal of Phytocosmetics and Natural Ingredients*, 5(1), 5–9. <https://doi.org/10.15171/ijpni.2018.09>
17. Lourenço, S. B., Gasparin, R. M., Tomaz, F. M., et al. (2024). Impact of hair damage on the penetration profile of coconut, avocado, and argan oils into Caucasian hair fibers. *Cosmetics*, 11(2), 64. <https://doi.org/10.3390/cosmetics11020064>
18. Sionkowska, A., Adamiak, K., Musiał, K., & Gadomska, M. (2020). Collagen based materials in cosmetic applications: A review. *Materials*, 13(4217). <https://doi.org/10.3390/ma13194217>
19. Abu-Kaya, M. G., Ghica, M.-V., Dinu-Pirvu, C.-E., Popa, L., Dănilă, E., Chelaru, C., Kaya, U. A., Talianu, M.-T., & Stavri, A.-M. (2022). Hair masks based on keratin and collagen. *ICAMS 2022 – 9th International Conference on Advanced Materials and Systems*, 97–102. <https://doi.org/10.24264/icams-2022.II.2>
20. Perinelli, D. R., Cambriani, A., Cespi, M., Tombesi, A., Pecchiolan, L., Sabbatini, B., Bonacucina, G., & Palmieri, G. F. (2025). Exploring the functional properties of hydrolyzed keratin: Filling the knowledge gap on surface active, emulsifying, and thickening properties. *ACS Omega*, 10, 12224–12232. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c10755>
21. Fan, J., Wu, L., Wang, J., Bian, X., Chen, C., & Chang, K. (2025). Performance and mechanism of hydrolyzed keratin for hair photoaging prevention. *Molecules*, 30(5), 1182. <https://doi.org/10.3390/molecules30051182>
22. Bui, H.-T. D., Kim, S. J., Jang, J., Lee, J. B., & Yoo, H. S. (2025). Recovery and protection of photo-damaged hairs with keratin-encapsulated cationic liposomes. *International Journal of Cosmetic Science*, 47(4), 730–739. <https://doi.org/10.1111/ics.13080>
23. United States Patent US20200346174A1. (2020). *Process for production of nano-microemulsion system of plant oil triglycerides*.
24. Lai, N. H., Dang, T. H. N., Nguyen, T. T., & Phan, D. T. Q. (2025). Utilizing lipid bond technology with molecular lipid complex to provide lipid treatment for damaged hair. *Dermatology Research and Practice*, 2025, Article 5385312. <https://doi.org/10.1155/drpr/5385312>
25. Tekhnichniy rehlement na kosmetychnu produktsiiu [Technical regulations for cosmetic products]. (n.d.). https://ucps.com.ua/build/files/technical_regulation_cosmetics.pdf
26. ДСТУ EN ISO 22716:2015. (2015). *Kosmetyka. Nalezhna vyrobnycha praktyka (GMP). Nastanovy z nalezhnoi vyrobnychoi praktyky (EN ISO 22716:2007, IDT)*.
27. Cosmetic Ingredients and Complexes Glossary. (n.d.). <https://ci.guide/botanical-complexes/hma-silky>
28. Lucas Meyer Cosmetics & Clariant. (n.d.). *Sunflohair*. SpecialChem. <https://www.specialchem.com/cosmetics/product/lucas-meyer-cosmetics-clariant-sunflohair>
29. SpecialChem. (n.d.). *Panthenol (INCI ingredient)*. <https://www.specialchem.com/cosmetics/inci-ingredients/panthenol>
30. Ascot International. (n.d.). *Sweet almond oil BP73*. SpecialChem. <https://www.specialchem.com/cosmetics/product/ascot-international-sweet-almond-oil-bp73>

31. Burnett, C. L., Bergfeld, W. F., Belsito, D. V., Hill, R. A., Klaassen, C. D., Liebler, D. C., Marks, J. G. Jr., Shank, R. C., Slaga, T. J., Snyder, P. W., Fiume, M., & Heldreth, B. (2024). Safety assessment of *Butyrospermum parkii* (shea)-derived ingredients as used in cosmetics. *International Journal of Toxicology*, 43(1_suppl), 82S–95S. <https://doi.org/10.1177/10915818231224230>
32. SpecialChem. (n.d.). *Emulsifiers: How to select the right grade for cosmetics?* <https://www.specialchem.com/cosmetics/guide/emulsifiers>
33. Evonik. (n.d.). *VARISOFT® BTMS Pellets MB*. https://personal-care.evonik.com/pim/fragment/personalcare/en/product/PR_52013381?page=1&orderBy=AT_FirstPublicationDate+desc,+Name+asc&f={}&ft={}&nfc={}&nf=false
34. Clariant. (n.d.). *Genamin® CTAC*. SpecialChem. <https://www.specialchem.com/cosmetics/product/clariant-genamin-ctac>
35. Koster Keunen. (n.d.). *Permulgin 0160*. <https://kosterkeunen.eu/e00160-permulgin-0160/>
36. SpecialChem. (n.d.). *Cetearyl alcohol (INCI ingredient)*. <https://www.specialchem.com/cosmetics/inci-ingredients/cetearyl-alcohol>
37. Ashland. (n.d.). *Euxyl™ PE 9010 preservative*. SpecialChem. <https://www.specialchem.com/cosmetics/product/ashland-euxyl-pe-9010-preservative>
38. Glooshi. (n.d.). *Polyquaternium-22: What is it, cosmetic uses, benefits & side effects*. <https://www.glooshi.com/polyquaternium-22/>
39. BASF. (n.d.). *Salcare® super 7 AT 1*. SpecialChem. <https://www.specialchem.com/cosmetics/product/basf-salcare-super-7-at-1>
40. Momentive Performance Materials. (n.d.). *Silsoft™ CLX-E conditioning agent*. Knowde. <https://www.knowde.com/stores/momentive-performance-materials/products/silsoft-clx-e-conditioning-agent>
41. SpecialChem. (n.d.). *Allantoin (INCI ingredient)*. <https://www.specialchem.com/cosmetics/inci-ingredients/allantoin>
42. XH Lactics. (n.d.). *Application of lactic acid in hair products: A new option for gentle care and hair quality improvement*. <https://www.xhlactics.com/application-of-lactic-acid-in-hair-products.html>
43. Nsengiyumva, E. M., & Alexandridis, P. (2022). Xanthan gum in aqueous solutions: Fundamentals and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 216, 583–604. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.06.189>
44. Becker, L. C., Bergfeld, W. F., Belsito, D. V., et al. (2019). Safety assessment of glycerin as used in cosmetics. *International Journal of Toxicology*, 38(3_suppl), 6S–22S. <https://doi.org/10.1177/1091581819883820>

Дата першого надходження рукопису до видання: 11.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 08.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

О. В. КАНІВЕЦЬ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-4364-8424

О. І. БІЛОВОД

кандидат технічних наук, доцент,
професор кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-3470-0091

Д. С. ТАРАСЕНКО

старший викладач кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0009-0002-4818-0963

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЯКОСТІ РОБОТИ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ МЕХАНОСКЛАДАЛЬНИХ ДІЛЬНИЦЬ

Стаття присвячена проблемі підвищення ефективності та якості роботи транспортних систем механоскладальних дільниць машинобудівних підприємств. Недосконала організація матеріальних потоків подовжує виробничий цикл; виникають проблеми обладнання та персоналу; збільшуються витрати на паливо та обслуговування транспорту. Метою роботи є дослідження ефективності функціонування та якості роботи транспортної системи механоскладальної дільниці на основі розробки та впровадження методики оптимізації матеріальних потоків. Проведено огляд наукової літератури з питань внутрішньовиробничої логістики. Розглянуто застосування теорії графів для моделювання маршрутів. Проаналізовано методи імітаційного моделювання транспортних систем. Вивчено принципи ощадливого виробництва у цеховій логістиці. Досліджено ефективність різних видів промислового транспорту. Встановлено відсутність комплексної методики, яка поєднує аналіз потоків, планування простору та динамічне моделювання. У роботі обґрунтовано застосування інформаційних технологій у проєктуванні серійного виробництва. Описано основні завдання транспортної системи цеху. Виділено чотири етапи проєктування виробничих систем. Запропоновано методику вибору оптимальної схеми розташування обладнання, що базується на положеннях методу графів. Критерієм оптимізації виступає мінімум потужності вантажопотоку. Вихідними даними стали номенклатура деталей, технологічні маршрути та величини вантажопотоків. Побудовано графи матеріальних зв'язків між одиницями обладнання. Створено матриці схем розташування для дворядного компонування. Розроблено правила розрахунку енергії вантажопотоку. Методику доцільно застосовувати при проєктуванні гнучких автоматизованих дільниць. Вона придатна для реструктуризації діючого виробництва. Перестановка обладнання при зміні номенклатури забезпечує планувальну гнучкість. Результати дослідження мають практичне значення для підвищення конкурентоспроможності машинобудівних підприємств.

Ключові слова: механоскладальні дільниці, транспортні системи, вантажопотік, маршрут, метод графів.

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

O. I. BOLOVOD

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Mechanical and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0003-3470-0091

D. S. TARASENKO

Senior Lecturer at the Department of Mechanical and Electrical Engineering

Poltava State Agrarian University

ORCID: 0009-0002-4818-0963

IMPROVING THE EFFICIENCY AND QUALITY OF TRANSPORT SYSTEMS IN MECHANICAL ASSEMBLY DEPARTMENTS

The article is devoted to the problem of improving the efficiency and quality of transport systems in mechanical assembly shops of machine-building enterprises. Imperfect organization of material flows prolongs the production cycle; equipment and personnel downtime occurs; fuel and transport maintenance costs increase. The aim of the work is to study the efficiency and quality of the transport system of a mechanical assembly shop based on the development and implementation of a methodology for optimizing material flows. A review of scientific literature on intraservice logistics was conducted. The application of graph theory for route modeling was considered. Methods of simulation modeling of transport systems were analyzed. The principles of lean production in workshop logistics were studied. The efficiency of various types of industrial transport was investigated. The absence of a comprehensive methodology combining flow analysis, space planning, and dynamic modeling was established. The work substantiates the use of information technologies in the design of serial production. The main tasks of the workshop's transport system are described. Four stages of production system design have been identified. A methodology for selecting the optimal equipment layout based on graph theory has been proposed. The optimization criterion is the minimum cargo flow capacity. The initial data consisted of the nomenclature of parts, technological routes, and cargo flow values. Graphs of material connections between equipment units were constructed. Layout matrices for two-row configurations were created. Rules for calculating cargo flow energy were developed. The methodology is advisable to use when designing flexible automated sections. It is suitable for restructuring existing production. Rearranging equipment when changing the nomenclature provides planning flexibility. The research results are of practical importance for increasing the competitiveness of machine-building enterprises.

Key words: mechanical assembly areas, transport systems, cargo flow, route, graph method.

Постановка проблеми

Машинобудівна галузь є однією з основних складових промислового комплексу розвинених країн. В умовах глобальної конкуренції підприємства прагнуть підвищити ефективність виробництва та знизити собівартість продукції. Значний потенціал для цього забезпечує оптимізація внутрішньовиробничої логістики, зокрема транспортних систем механоскладальних цехів. Транспортні операції не створюють доданої вартості продукції, проте становлять від 15% до 40% її кінцевої собівартості [1]. Недосконала організація матеріальних потоків зумовлює подовження виробничого циклу, утворення «вузьких місць», простої обладнання та персоналу, а також підвищення витрат на паливо, ремонт і технічне обслуговування транспортних засобів [2]. Отже, актуальність дослідження визначається потребою у розробленні науково обґрунтованих методів і засобів, спрямованих на мінімізацію логістичних витрат шляхом раціоналізації руху матеріальних ресурсів у межах виробничого підрозділу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Задачі підвищення ефективності та якості роботи внутрішньовиробничих транспортних систем є постійною темою наукових дискусій. Так, у роботі [3] розглядається теоретичне використання теорії графів, яку можна використати, для моделювання внутріцехового переміщення заготовок та деталей. Автор запропонував різноманітні алгоритми пошуку найкоротших шляхів, проте розроблені моделі руху не враховують динамічний характер виробничих процесів. Дослідження методів імітаційного моделювання та аналізу пропускної здатності транспортних систем машиноскладальних цехів наведено у роботі [4]. Симуляційний підхід розрахунку транспортних систем показав ефективність під час виявлення «вузьких місць» між робочими зонами дільниці, але у дослідженні відсутні практичні інструменти для оптимізації просторового планування цехів. Впровадження принципів ощадливого виробництва у внутрішньоцеховій логістиці вивчають науковці Карвац А. (Karwasz A.) та Скуза Д. (Skuza D.) [5]. Проведені дослідження виявили залежність між мінімізацією запасів і застосуванням системи «точно в терміни», що приводять до зниження навантаження на транспортну систему та скорочення непродуктивних витрат. Аналіз ефективності використання різних видів промислового транспорту, зокрема навантажувачів, візків і конвеєрів розглянуто у [6]. У дослідженні надано рекомендації щодо вибору транспортних засобів залежно від умов виробництва, проте не розглянуто проблему взаємозв'язку з плануванням виробничих дільниць. Робота [7] присвячена використанню картування потоку створення вартості як інструменту впровадження ощадливого виробництва та основи для заходів з удосконалення, зокрема, для ефективного впровадження методів Kanban і Milkrun, які дають змогу оптимізувати просторове розташування виробничих дільниць. Водночас ефективність використання такого підходу залежить від наявності точних даних про інтенсивність потоків, отримання яких без моделювання є складним завданням. Дослідження [8] зосереджене на економічних аспектах функціонування внутрішньоцехового транспорту. Автори пропонують моделі розрахунку

транспортних витрат, що забезпечують оцінювання ефективності організаційних змін, проте не передбачають формування оптимізаційних рішень.

Таким чином, більшість досліджень зосереджується на окремих аспектах удосконалення внутрішньовиробничих транспортних систем. Наразі відсутня комплексна методика, що поєднує аналіз інтенсивності матеріальних потоків, раціональне планування виробничого простору та динамічне імітаційне моделювання для перевірки запропонованих рішень. Представлене дослідження спрямоване на усунення цієї науково-практичної прогалини.

Формулювання мети дослідження

Дослідження ефективності функціонування та якості роботи транспортної системи механоскладальної дільниці на основі розробки та впровадження методики оптимізації матеріальних потоків.

Викладення основного матеріалу дослідження

Транспортна система суттєво впливає на роботу всього виробництва. Вона забезпечує своєчасне завантаження та розвантаження обладнання заготовками і інструментами, а також виконання складських операцій. Від оптимальної організації матеріальних потоків та структури транспортної системи залежить рівень завантаження устаткування, використання площі, витрати енергії та обсяг експлуатаційних витрат. Як результат це визначає собівартість продукції.

Основні завдання транспортної системи наступні: доставка вантажів зі складу у потрібний час на відповідну виробничу дільницю; переміщення, орієнтація і встановлення напівфабрикатів у визначений момент на необхідне обладнання; зняття напівфабрикатів або готової продукції з устаткування з подальшим транспортуванням у задане місце; передавання вантажів у накопичувач і своєчасна їх видача; доставка напівфабрикатів та готової продукції з виробничих дільниць на склад.

Технологічне обладнання переміщують у випадку реструктуризації, технічного переоснащення чи реконструкції діючого виробництва, а також під час проєктування нового цеху. Просторове розміщення верстатів формує структуру технологічної системи та визначає особливості матеріальних потоків. На їх організацію припадає до 70% витрат на виготовлення продукції, а в окремих випадках і до 80% [9]. Тому зниження загальних витрат можливе через удосконалення виробничої структури, що передбачає переміщення основного обладнання та перегрупування виробів, що обґрунтовує потребу у створенні технологічно орієнтованих систем. Одночасно виникає завдання розробки та розвитку науково-методичних основ подібної реструктуризації. Проблематика аналізу, синтезу й удосконалення структури технологічних систем серійного машинобудівного виробництва має значний науковий інтерес.

Ефективність виробничого процесу, значною мірою, визначається способом організації транспортування. Транспортні операції відображають зв'язки між етапами технологічного процесу. Система транспортування повинна забезпечувати своєчасне та послідовне виконання запитів основного обладнання, складів і накопичувачів щодо заготовок, напівфабрикатів і готової продукції.

Зменшити трудомісткість транспортування можливо завдяки використанню автоматизованих засобів у цехах і на виробничих дільницях. Використання однотипних транспортних засобів у межах виробничої системи полегшує їх експлуатацію та керування.

Для автоматизації завантаження і розвантаження основного обладнання та його поєднання з транспортною системою застосовують промислові роботи. Під час проєктування дільниць і цехів використовують різні принципи формування, що залежать від номенклатури та обсягу випуску продукції, які у свою чергу визначають форму організації виробництва. У випадку поступового зростання номенклатури виробів доцільно враховувати спільність технологічних маршрутів їх виготовлення та застосовувати предметний принцип формування виробничих дільниць. Виходячи з описаного принципу, а також попередньо визначеного складу і кількості обладнання, встановлюють кількість верстатів на кожній дільниці.

Сучасні механоскладальні дільниці та цехи є складними динамічними системами. Проєктування подібних систем включає чотири етапи: структурно-функціональний, алгоритмічний, параметричний і планувальний. У разі масштабних завдань синтез кінцевого результату може проходити у кілька циклів з різним рівнем деталізації даних і прийнятих рішень. Кожен цикл охоплює всі названі етапи. Наприклад, при проєктуванні цеху перший цикл завершується створенням компоновки, другий – плануванням виробничих дільниць.

Суть структурно-функціонального етапу полягає у створенні структурної моделі, яка відображає склад, тип і взаємозв'язки елементів, а також функціональної моделі, що враховує властивості елементів і системи для виконання ними своїх завдань. Даний етап проєктування технологічної системи виробничого підрозділу супроводжується визначенням комплексу технологічних процесів, формуванням основи проєкту, обранням обладнання, встановленням складу дільниць і кількості верстатів.

Алгоритмічний етап передбачає побудову алгоритмічної моделі, яка відображає взаємозв'язки між елементами та підсистемами у процесі виробництва. На цьому етапі здійснюється вибір порядку обслуговування заготовок і розробляються графіки, що підтверджують достатність визначеної кількості обладнання.

На параметричному етапі проектування визначають кількісні характеристики зв'язків між фізичними параметрами елементів системи. Параметричні моделі описують рівняння матеріально-енергетичного балансу в різних формах. У межах цього етапу виконують розрахунки параметрів потоків матеріальних, енергетичних та інформаційних ресурсів. На основі отриманих результатів встановлюють склад і кількість допоміжного обладнання, визначають потребу в обслуговуючих системах та формують вимоги до виробничої інфраструктури.

Завершальний планувальний етап спрямований на визначення просторових зв'язків між елементами системи. Моделі даного етапу подібні до структурних, проте оцінювання зв'язків між елементами здійснюється в метриці евклідового простору. Результатом є планувальне рішення розміщення виробничих дільниць. Кожен етап синтезу технологічної системи виробництва поділяється на кілька підетапів, що характеризуються власними обмеженнями. Процес проектування може здійснюватися двома підходами. Перший передбачає введення зворотних зв'язків, які забезпечують можливість повернення до попереднього етапу у разі невідповідності встановленим обмеженням. Другий полягає у поділі етапів на послідовність проектних завдань, впорядкованих таким чином, щоб мінімізувати або усунути потребу повторного повернення до попередніх рішень.

Серійні технологічні системи мають унікальні особливості у структуризації сукупності технологічних процесів виготовлення продукції. Структуризація підвищує організаційний рівень складових системи та скорочує час переходу від виготовлення одного виду виробу до іншого. Процес структуризації сукупності технологічних процесів називають уніфікацією. Під час уніфікації здійснюється перехід від великої кількості окремих технологічних процесів до меншої кількості уніфікованих. Критерієм вибору оптимальної схеми розташування обладнання виступає мінімум потужності вантажопотоку або матеріального потоку.

Організація оптимальних вантажопотоків передбачає скорочення довжини транспортних маршрутів, мінімізацію перетинів і розгалужень, усунення петель і зворотних трас, а також забезпечення зручності обслуговування транспортних засобів. Рациональна схема розміщення верстатів на виробничій дільниці зменшує потребу у транспортних засобах, скорочує прості обладнання, покращує управління виробництвом та знижує капітальні, енергетичні та експлуатаційні витрати. Зменшення потужності матеріального потоку за рахунок раціонального розташування обладнання потребує застосування методів оптимізації під час вибору найбільш доцільної схеми розміщення технологічного обладнання на предметних дільницях.

Проектування раціональної схеми розташування технологічного обладнання на предметних дільницях здійснюють методами оптимізації та математичного моделювання. Вибір оптимальної схеми проводять за методикою, що базується на положеннях методу графів. Вихідними даними розрахунку є номенклатура деталей, технологія їх виготовлення у вигляді послідовності обладнання для проведення конкретних операцій механічної обробки, а також величина матеріального або вантажопотоку для кожної групи деталей.

Вихідні дані вибору оптимальної схеми розташування технологічного обладнання наступні:

- технологічний маршрут 3–6–1–4–5 відповідає обробці деталі 1 із величиною вантажопотоку 3;
- технологічний маршрут 4–2–6–5 відповідає обробці деталі 2 із величиною вантажопотоку 1;
- технологічний маршрут 2–5–4 відповідає обробці деталі 3 із величиною вантажопотоку 5;
- технологічний маршрут 1–3–2 відповідає обробці деталі 2 із величиною вантажопотоку 2.

Побудову матриці схеми розташування технологічного обладнання розпочинаємо із створення графів матеріальних зв'язків (рис. 1) між одиницями обладнання у варіанті довільного дворядного розташування, що є найбільш поширеним у виробництві. Ребра графа відображають величину вантажопотоку між окремими одиницями. Більш раціональним варіантом є поєднання входу і виходу вантажопотоку з виробничої дільниці, що дає змогу скоротити кількість холостих переміщень внутрішньоцехового транспорту.

Після аналізу отриманих результатів визначаємо верстат із найбільшим потенціалом і ставляємо його на першу позицію. Відповідно до розрахунків граф змінюємо. Спираючись на значення потенціалів, заповнюємо матрицю схеми розташування обладнання на виробничій дільниці. Використовуємо наступні правила: коли обладнання, з якого починається вантажопотік, розташоване в сусідньому ряду, записуємо величину вантажопотоку для цього маршруту; коли через один ряд – вносимо від'ємне значення вантажопотоку; коли через два ряди – подвоєне від'ємне значення, і так далі; коли обладнання за маршрутом знаходиться в одному ряду – фіксуємо подвоєну величину вантажопотоку.

Після обчислення енергії вантажопотоку для всіх технологічних маршрутів та заповнення матриці, орієнтованої на вхід і вихід, визначаємо сумарне значення енергії для кожної одиниці обладнання. Шляхом підсумовування енергії всіх одиниць отримуємо загальну енергію вантажопотоку побудованої схеми розташування обладнання.

Для перевірки оптимальності схеми виконуємо перестановку обладнання з найменшим потенціалом. Для нової матриці за тією ж методикою обчислюємо енергію та порівнюють її з початковим значенням. Якщо отримане значення енергії менше, то початкова схема вважається раціональнішою. Якщо більше – виконуємо подальший пошук у тій самій послідовності, поки не буде знайдено схему з максимальною потенційною енергією вантажопотоку. В умовах автоматизованого проектування можливий автоматичний пошук оптимальної схеми розташування обладнання на виробничій дільниці за алгоритмом, що враховує наведені вище правила.

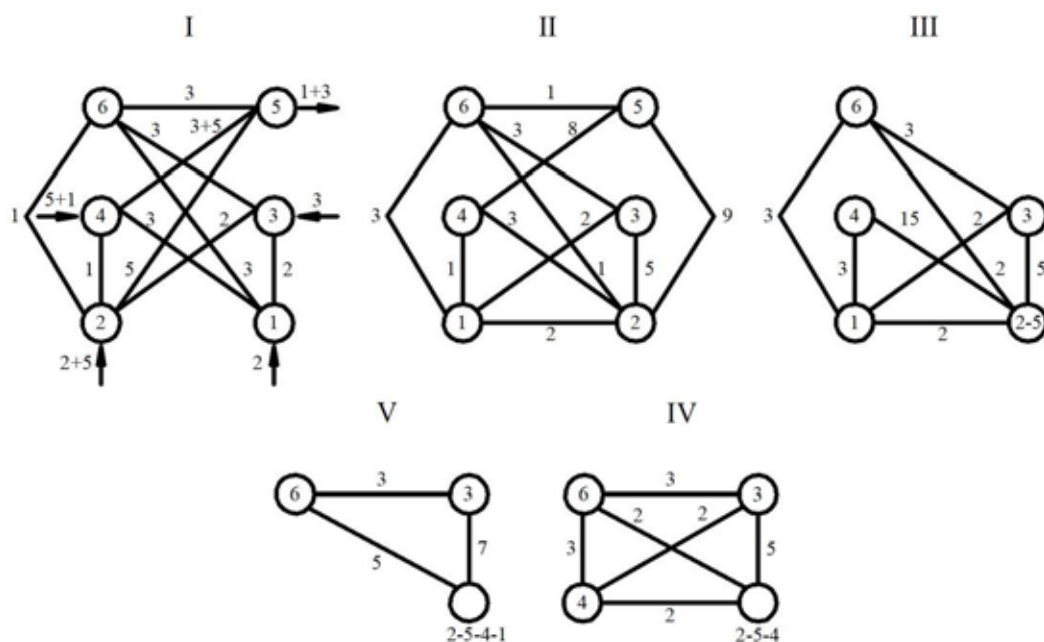


Рис. 1. Графи матеріальних зв'язків між технологічним обладнанням

Висновки

Запропоновану методику побудови схем розташування технологічного обладнання на предметних дільницях, яка базується на поєднанні методів оптимізації, доцільно застосовувати не лише під час проектування гнучких автоматизованих дільниць, а й у процесі їх експлуатації шляхом перестановки обладнання при зміні номенклатури продукції, що забезпечує планувальну гнучкість виробництва, під час проектування як нових виробничих дільниць, так і для реструктуризації, технічного переоснащення чи реконструкції діючого виробництва.

Список використаної літератури

1. 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>.
2. 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>.
3. Кузьменко І. М. Теорія графів. Київ : КНІ ім. Ігоря Сікорського. 2020. 71 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/35854/1/Teoriia_hrafov.pdf.
4. Foit K., Gołda G., Kampa A. Integration and Evaluation of Intra-Logistics Processes in Flexible Production Systems Based on OEE Metrics, with the Use of Computer Modelling and Simulation of AGVs. *Processes.* 2020. Vol. 8(12). pp. 1648. <https://doi.org/10.3390/pr8121648>.
5. Karwasz A., Skuza D. Improving Internal Transport. *Lecture Notes in Electrical Engineering.* Springer, Cham. 2019. Vol. 505. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91334-6_53.
6. Salawu G., Glen B. Improving the Efficiency of a Conveyor System in an Automated Manufacturing Environment Using a Model-Based Approach. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research.* 2023. Vol. 12. No. 2. pp. 107–112. DOI: 10.18178/ijmerr.12.2.107-112.
7. Álvarez R., Calvo R., Peña M. M., Domingo R. Redesigning an Assembly Line Through Lean Manufacturing Tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* 2008. Vol. 43. pp. 949–958. DOI: 10.1007/s00170-008-1772-2.
8. Ramos B., Araújo J., Ramos J., Ferreira A. C. Improving Material Delivery Routes on Automotive Industry Assembly Lines Through the Application of Lean Logistics: A Case Study. *Lecture Notes in Mechanical Engineering.* Springer, Cham. 2025. pp. 165–177. https://doi.org/10.1007/978-3-031-94484-0_14.
9. 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>.

References

1. 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>
2. 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>
3. Kuzmenko, I. M. (2020). Teoriia hrafiv. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/35854/1/Teoriia_hrafiv.pdf [In Ukrainian].
4. Foit, K., Gólda, G., & Kampa, A. (2020). Integration and Evaluation of Intra-Logistics Processes in Flexible Production Systems Based on OEE Metrics, with the Use of Computer Modelling and Simulation of AGVs. *Processes*, 8(12), 1648. <https://doi.org/10.3390/pr8121648>.
5. Karwasz, A., Skuza, D. (2019). Improving Internal Transport. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. Springer, Cham, vol. 505. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91334-6_53.
6. Salawu, G., & Glen, B. (2023). Improving the Efficiency of a Conveyor System in an Automated Manufacturing Environment Using a Model-Based Approach. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, Vol. 12, No. 2, 107–112. DOI: 10.18178/ijmerr.12.2.107-112.
7. Álvarez, R., Calvo, R., Peña, M. M., & Domingo, R. (2008). Redesigning an Assembly Line Through Lean Manufacturing Tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43, 949–958. DOI: 10.1007/s00170-008-1772-2.
8. Ramos, B., Araújo, J., Ramos, J., & Ferreira, A.C. (2025). Improving Material Delivery Routes on Automotive Industry Assembly Lines Through the Application of Lean Logistics: A Case Study. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 165–177. https://doi.org/10.1007/978-3-031-94484-0_14.
9. 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, 35–46. DOI: https://doi.org/10.14445/23497157/IJRES-V12I3P105_

Дата першого надходження рукопису до видання: 19.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 16.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

А. В. КАСЬЯН

аспірант кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0008-9820-658X

О. С. ГАЛЕЦЬКИЙ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-5733-5846

РОЗРОБКА СТЕНДУ ДЛЯ ВИПРОБОВУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ПНЕВМАТИЧНОГО ПОЗИЦІЙНОГО ПРИВОДУ

В даній роботі представлено розробку стенду для дослідження енергоефективного пневматичного позиційного приводу на базі безштокового пневматичного циліндра. Також, проілюстровано приклади конкретних дослідів, що можливо проводити на даному обладнанні. Створення енергоефективного позиційного пневматичного приводу є актуальним через широкий спектр промислових завдань, де застосовуються пневмосистеми. У рамках цього дослідження основна увага приділена розробці та випробуванню реального експериментального стенду, що дозволяє оцінювати характеристики позиційного приводу та спрощувати його подальшу інтеграцію до різних технічних систем.

Методологія дослідження заснована на комплексному описі розробленого стенду для випробування пневматичного позиційного приводу на базі безштокового пневмоциліндра. В рамках методології представлена пневматична схема стенду, а також структурна схема, що відображає взаємодію пневматичних елементів з електронними компонентами системи керування, що включає контролер ESP32, розподільні клапани та лазерний датчик переміщення.

Додатково сформульовані процедури проведення експериментів: калібрування датчика, статичні вимірювання положення, динамічні перехідні процеси та випробування під навантаженням. Описано методи реєстрації даних та принципи їх обробки з використанням програмних засобів на Python. Така методична основа забезпечує відтворюваність експериментів та коректність подальшого аналізу результатів.

Результатом виконаної роботи є функціональний експериментальний стенд для дослідження позиційного пневматичного приводу на базі безштокового пневмоциліндра. Стенд забезпечує відтворювані умови для проведення статичних та динамічних випробувань, включаючи вимірювання переміщення з високою дискретністю, аналіз перехідних процесів та оцінку точності позиціонування за різних режимів подачі повітря.

Отримані експериментальні дані підтверджують можливість досягнення проміжних положень за рахунок регулювання тиску та часових параметрів роботи розподільчих клапанів. Розроблена система може використовуватися для тестування алгоритмів керування, налаштування приводів різних типорозмірів, а також попередньої оцінки характеристик пневматичних систем без необхідності застосування дорогого промислового обладнання.

Ключові слова: пневматичний позиційний привід; позиціонування; енергоефективний привід; експериментальний стенд; безштоковий циліндр.

A. V. KASIAN

Postgraduate Student at the Department of Applied Hydroaeromechanics
and Mechatronics
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0009-0008-9820-658X

O. S. HALETSKII

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Applied Hydroaeromechanics
and Mechatronics
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0001-5733-5846

DESIGN OF A TEST BENCH FOR EXPERIMENTING WITH AN ENERGY-EFFICIENT PNEUMATIC POSITIONING ACTUATOR

This paper presents the development of a stand for researching an energy-efficient pneumatic position drive based on a rodless pneumatic cylinder. Also, examples of specific experiments that can be carried out on this equipment are illustrated. The creation of an energy-efficient positional pneumatic drive is relevant due to the wide range of industrial tasks where pneumatic systems are used. Within the framework of this research, the main attention is paid to the development and testing of a real experimental stand, which allows evaluating the characteristics of the positional drive and simplifying its further integration into various technical systems.

The research methodology is based on a comprehensive description of the developed stand for testing a pneumatic position drive based on a rodless pneumatic cylinder. The methodology presents a pneumatic diagram of the stand, as well as a structural diagram reflecting the interaction of pneumatic elements with electronic components of the control system, including the ESP32 controller, distribution valves and a laser displacement sensor.

Additionally, the procedures for conducting experiments are formulated: sensor calibration, static position measurements, dynamic transients and tests under load. The methods of data recording and the principles of their processing using Python software are described. Such a methodological basis ensures the reproducibility of experiments and the correctness of further analysis of the results.

The result of the work is a functional experimental stand for studying a positional pneumatic actuator based on a rodless pneumatic cylinder. The stand provides reproducible conditions for conducting static and dynamic tests, including high-resolution displacement measurements, transient analysis, and positioning accuracy assessment under different air supply conditions.

The experimental data obtained confirm the possibility of achieving intermediate positions by adjusting the pressure and time parameters of the distribution valves. The developed system can be used for testing control algorithms, tuning actuators of different sizes, and preliminary assessment of the characteristics of pneumatic systems without the need for expensive industrial equipment.

Key words: *pneumatic positioning actuator; positioning; energy-efficient actuator; experimental test bench; rodless cylinder.*

Постановка проблеми

У промисловості приводи широко застосовуються для автоматизації та точного позиціонування різних механізмів. Найбільш поширеними технологіями залишаються електричні та гідравлічні приводи, що мають високу точність та енергоефективність. Тим не менш, у ряді промислових завдань привабливим варіантом є пневматичний привід завдяки його простоті, надійності та здатності працювати у складних експлуатаційних умовах.

При цьому однією з ключових проблем для широкого впровадження пневматичних систем є труднощі з точним позиціонуванням і контролем руху, а також відносно низька енергоефективність. Ці обмеження пов'язані з нелінійністю пневматичних процесів, стисненням повітря, втратами на тертя та теплопередачу. Для вирішення цих проблем необхідні експериментальні дослідження, що дозволяють детально оцінити поведінку пневматичного приводу та розробити методи управління, що підвищують точність позиціонування та ефективність витрати енергії.

Розробка та випробування спеціалізованого стенду дозволяють проводити такі дослідження у лабораторних умовах, отримувати відтворювані дані та тестувати різні режими роботи приводу, що є важливим кроком для практичного впровадження енергоефективних пневматичних систем у автоматизовані виробничі процеси.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Системи позиційного приводу займають ключове місце у промисловій автоматизації та залишаються об'єктом активних досліджень, спрямованих на розробку нових методів управління та конструктивних підходів [1]. В останні роки особлива увага приділяється пневматичним приводам, які розглядаються як економічно ефективний та надійний варіант вирішення завдань точного позиціонування [2]. Тим не менш, властиві таким системам нелінійність і складна динаміка суттєво ускладнюють процес управління, що робить необхідним застосування сучасних технологій для підвищення їх точності та стабільності роботи.

В одній із робіт був представлений та перевірений на лабораторному стенді алгоритм керування положенням пневматичного приводу [3]. Експериментальна установка включала подвійну дію циліндр, вимірювальні датчики

та систему реєстрації, що дозволило оцінити поведінку приводу в умовах, близьких до реальних. Результати показали, що запропонований метод здатний підвищувати точність позиціонування, однак автори відзначають обмежену стійкість до зміни навантаження, вплив мертвої зони та чутливість до похибок моделі. Отже, незважаючи на наявність ефективних підходів, існуючі рішення все ще потребують подальшого вдосконалення, особливо з точки зору стабільності та надійності у практичних умовах.

У низці досліджень [4] виконувались експерименти з позиціонування пневмоприводу, а також перевірялися практичні методи підвищення його енергоефективності. На лабораторному стенді використовували одиночний пневмоциліндр з буферним ресивером, швидкодіючими впускними та випускними клапанами, а також датчиками тиску та положення. Реалізовувалися стратегії дозованого подачі повітря та оптимізації моментів перемикання клапанів для більш ефективного використання енергії газу, що розширюється. Отримані результати показали зниження витрати повітря та покращення динаміки зупинки приводу, проте також виявили низку обмежень – чутливість до помилок моделі, вплив тертя, витоків та теплових ефектів, а також зниження ефективності при переході від лабораторних умов до реальних промислових систем.

Подібні стенди також застосовувалися в дослідженнях, присвячених керуванню пневмоприводами з використанням PWM-модуляції та нелінійних методів: пропонувалися гібридні схеми регуляторів [5] та методи ковзного модального керування з урахуванням дискретності клапанів [6]. Такі роботи підкреслюють важливість моделювання динаміки клапанів та оптимізації керуючих сигналів для забезпечення високої точності позиціонування.

Зіставлення результатів щодо позиціонування та енергоефективності показує, що об'єднання експериментальних напрацювань стендових досліджень із сучасними алгоритмами управління (адаптивні/предиктивні схеми, компенсація мертвих зон та шумів) дає реальну перспективу створення пневматичного позиційного приводу з високою енергоефективністю; при цьому залишається завдання підвищення стійкості методів до варіацій навантаження та практичних втрат – саме це і пропонується вирішити у цій роботі.

Формулювання мети дослідження

Метою цього дослідження є розробка та експериментальна перевірка енергоефективного пневматичного позиційного приводу на базі безштокового пневмоциліндра. Дослідження передбачає створення лабораторного стенду, що дозволяє реалізувати та оцінити ефективність алгоритмів керування, спрямованих на оптимізацію витрат стисненого повітря при збереженні високої точності позиціонування.

Викладення основного матеріалу дослідження

Було розроблено схему експериментального стенду для дослідження функціональних можливостей пневматичного позиційного приводу (рис. 1).

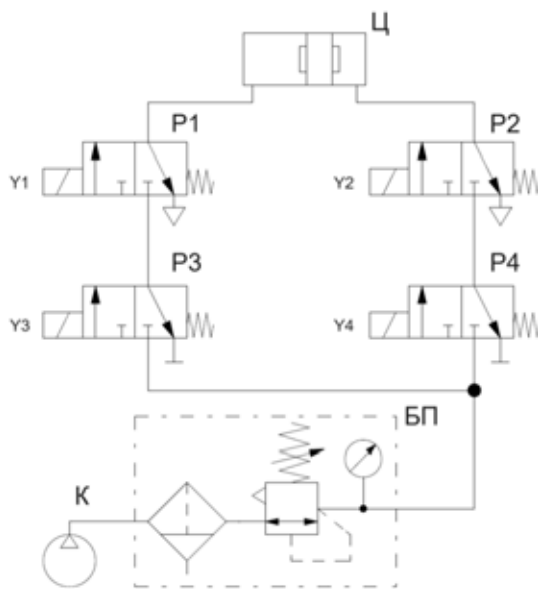


Рис. 1. Пневматична схема стенда для дослідження позиційного пневматичного приводу

Пневматична схема (рис. 1) складається з безштокового пневматичного циліндра Ц, чотирьох трилінійних двопозиційних клапанів з електромагнітним керуванням, блоку підготовки повітря та компресору. Рух циліндра відбувається за рахунок подачі стисненого повітря від компресору К через блок підготовки повітря БП. Тиск в системі регулюється за допомогою клапанів блоку підготовки повітря. Подача та відвід повітря до лівої, реалізовано за допомогою розподільників P1 та P3, що послідовно з'єднані. Подача та відвід повітря в праву камеру

виконується за рахунок розподільників P2 та P4. Розподільники P1 та P2 з'єднані з атмосферою, а P3 та P4 для можливості руху вправо та вліво, і зупинки проміжному положенні, за рахунок перекриття подачі повітря та/або замкнення повітря в камерах циліндру.

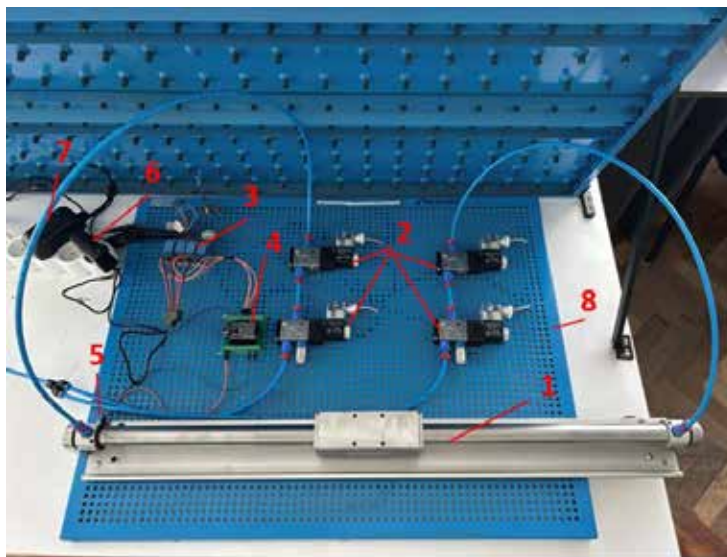


Рис. 2. Стенд для дослідження пневматичного позиційного приводу

На стенді, показаному на рис. 2, розміщено безштоковий пневматичний циліндр (1), під'єднаний до пневматичного розподільника 3/2 з електромагнітним керуванням (2). Для комутації використовується блок релейних модулів на 3.3 В (3), керування якими здійснює мікроконтролер ESP32 (4). Вимірювання переміщення рухомої частини виконується лазерним датчиком відстані VL53L0X (5), результати зчитування з якого передаються безпосередньо до мікроконтролера. Живлення релейних модулів і допоміжної електроніки забезпечує джерело на 3 В, 3 Вт (6), а електромагніти пневморозподільника отримують напругу від окремого блока живлення на 12 В, 36 Вт (7). Усі елементи змонтовані на монтажній плиті (8), а циліндр додатково закріплено гвинтами до столу, щоб унеможливити його зміщення під дією інерційних сил. Релейні модулі, спрацьовуючи, подають напругу на електромагніти розподільника, забезпечуючи зміну напрямку подачі повітря, тоді як програмне забезпечення на Python не лише керує комутацією, а й відображає поточне положення каретки у графічному інтерфейсі.

Для фіксації додаткової маси (рис. 3) використовуються отвори M5 на каретці циліндру, тарована вага при тискається болтами.

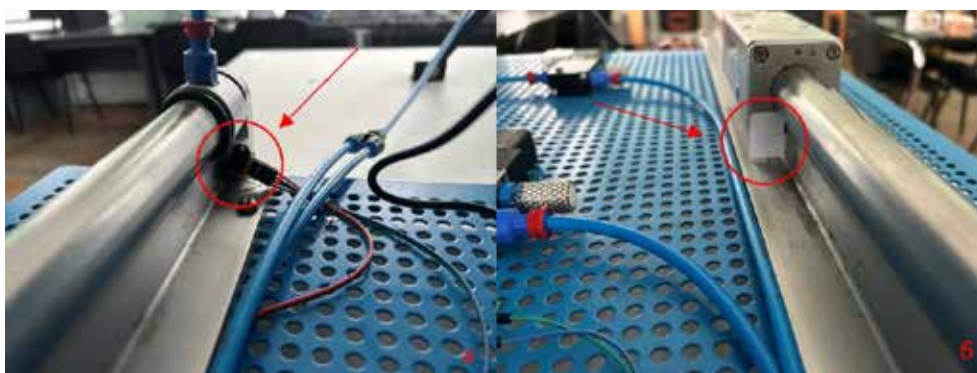


Рис. 3. Закріплення лазерного датчика відстані

На рис. 3 (а) зображено яким чином забезпечується закріплення датчика відстані. Датчик фіксується на корпусі за допомогою клейкої монтажної стрічки, та дроти від датчика зафіксовані на монтажній платформі проволочною, для надійної фіксації та запобігання зміни позиції датчика, що може вплинути на точність отриманих даних. Для того щоб підвищити точність, поверхня від якої буде відбиватися випромінювання з датчика має бути білою та матовою, тому на каретці було закріплено лист з білого паперу (рис. 3 (б)).

Було проведено підбір та налаштування обладнання.

1. Пневматичний безштоковий циліндр FESTO 8715 DF0-25-600 PPV-A

З доступних в наявності циліндрів, було обрано саме цей, тому що він має великий хід, і це є вагомою характеристикою, бо для дослідження позиційного приводу на основі розширення стисненого газу, необхідно мати великий хід, особливо при дослідженні з великим тиском в системі (до 5 бар). Також, для спрощення математичної моделі і можливості реалізації позиціонування з початковим поданням рівного тиску в обидві порожнини – наявність симетричної конструкції значно спрощує реалізацію. Окрім цього, для дослідів з додатковою масою, каретка циліндру має велику кількість отворів з різьбою, це дозволяє легко фіксувати додаткову масу. Циліндр розрахований на 6 бар, має хід 600мм та діаметр 25мм.

2. Пневматичний розподільник 3/2 ANKUK VALVE 3V210-06

Має широкий діапазон робочого тиску 1.5-8 бар, що підходить до характеристик циліндру та дозволяє провести дослід з різними тисками в діапазоні від 1.5 до 5.5 бар. Має різьбу G1/8", що відповідає іншому доступному обладнанню в лабораторії. Магнітна котушка має наступні характеристики:

- Напруга живлення в DC 12V
- Діапазон робочої напруги DC 7.2V – 14.6V
- Потужність: 5W
- Ступінь захисту: IP65
- 100%ED – означає, що клапан може бути постійно увімкнений (режим безперервної роботи)

Можливість безперервної роботи важлива для даної установки, це дозволить безпечно проводити всі заплановані досліді.

3. Блок живлення YS-134 12B 3A 5.5x2.1мм

Для забезпечення живлення 4 магнітів на 12V 5W розрахуємо необхідне значення сили струму

$$I = \frac{P}{U}$$

Домножимо на кількість магнітів

$$I = 4 \cdot \frac{P}{U} = 4 \cdot \frac{5}{12} \approx 1.7 A$$

Тож, даного блоку живлення має вистачити з великим запасом по струму і потужності.

4. Розгалужувач живлення Atis L4 (A_DC_L4) 5.5x2.1мм

Для зручного підключення 4 магнітів від одного блоку живлення, було прийнято рішення використати розгалужувач від одного на чотири виходи.

5. Мікроконтроллер ESP32

Було обрано, так як він має порівняно невелику вартість з подібними аналогами такими як Arduino чи STM, при цьому настільки ж легко для нього писати скрипти, як і під Arduino, використовуючи Arduino IDE, та має в рази кращі характеристики:

- 2 ядра 240 МГц
- RAM 520 КБ
- Пам'ять 4 МБ
- Велика кількість пінів (30 GPIO)
- До 18 аналогових пінів
- 2 набори I2C
- Має вбудований WiFi та Bluetooth модулі

Це дозволяє виділити один процесор на роботу з датчиками, інший – на інтерфейс. Має можливість підключення великої кількості реле та датчиків, це надає можливість легкого масштабування системи за необхідності. Здатний швидко обробляти сигнали, що важливо для точності позиціонування.

6. Модуль реле 3.3V

Для керування 4 магнітами було обрано відповідну кількість релейних модулів на 3.3 вольти, тому що логіка ESP32 працює саме на цій напрузі. Також, треба враховувати важливий нюанс, реле при подачі живлення, якщо сигнал має низький рівень, то воно перемикається. Тобто треба робити інверсію сигналу. Найпростіше робити це програмно. Бо у вимкненому стані, реле мають бути нормально відкриті. Споживає приблизно 70 мА при 3 вольтах. Час спрацювання 10 мс, час відпускання 5 мс.

7. Блок живлення 3V 1A

Для живлення 4 релейних модулів більш надійно та безпечно використовувати окреме джерело живлення замість плати. Розрахуємо необхідне значення струму для блоку живлення:

$$I = 4 \cdot 70 = 280 mA$$

Отже, маємо великий запас по струму.

8. Лазерний далекомір TOF400C VL53L1X I2C

Для того щоб отримувати більш точні результати, та швидше їх обробляти, було прийнято рішення використувати лазерний далекомір TOF400C VL53L1X I2C. Та спершу його треба зафіксувати в правильній позиції, щоб отримувати коректні заміри. Для цього програмним чином, його було налаштовано на довгу відстань, так як хід в циліндру 600мм. Наступним кроком, була його фіксація, в такій позиції, щоб в початковій, та кінцевій позиції значення відстані співпадали з замірами виконаними вручну міліметровою рулеткою. Також, він працює від 3.3 вольти, що є зручним для підключення до ESP32.

9. Плата розширення для ESP32, термінальний адаптер, 30 контактів

Для зручного та надійного підключення дротів до плати, було використано плату розширення, що дозволяє надійно прикрутити та зафіксувати дроти без пайки. Що є важливим для стенду, бо часто буває таке, що треба змінювати схему.

10. Розгалужувач 2 на 12 для з'єднання монтажу проводів

Для підключення живлення від блоку на 3 вольти до всіх реле, було використано розгалужувач, який дозволяє спростити та пришвидшити підключення дротів без використання пайки. Також, його було використано щоб з'єднати землю блоку живлення і плати для коректної роботи релейних модулів при використанні зовнішнього живлення.

11. Клемник 2 важелі PCT-212

Червоний дріт живлення до магнітів проходить через реле, що дозволяє керувати магнітом за допомогою плати. А синій дріт, для швидкого монтажу, було з'єднано з магнітом через клемник.

12. Монтажна плита FESTO

Для фіксації елементів системи було використано монтажну плиту, яка дозволила сховати дроти, та надійно зафіксувати пневматичну і електричну частини стенду.

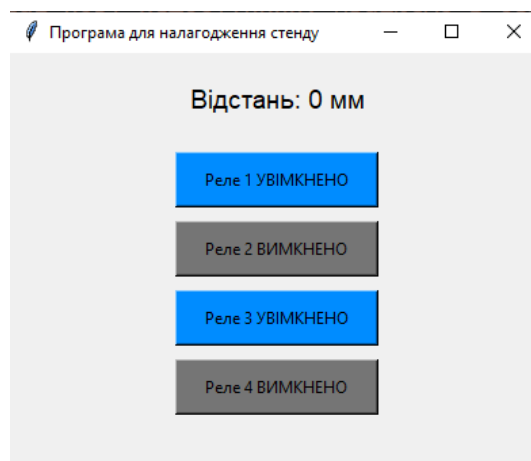


Рис. 4. Програма для налагоджування стенду

Для перевірки роботи стенду та налаштування датчика була створена програма на Python із графічним інтерфейсом та відповідний скрипт для керування мікроконтролером. На рис. 4 показано інтерфейс цієї програми: у верхній частині відображається виміряна відстань, а під нею розташовані кнопки керування кожним реле. У вимкненому стані кнопки сірі та позначені “ВИМКНЕНО”, у ввімкненому – сині з написом “УВІМКНЕНО”. Натиснення кнопки змінює стан відповідного реле та негайно відображається в інтерфейсі, а команди передаються на мікроконтролер через послідовний порт. Дані про відстань, навпаки, надходять від плати до комп’ютера тим самим каналом. Програма використовується для первинного налагодження: перевірки правильності підключення, працездатності елементів та точного позиціонування датчика, зокрема визначення відлікової точки, що відповідає 0 мм.

Додатково було розроблено комп’ютерні програми на Python для проведення дослідів. Декілька прикладів з можливих дослідів: визначення залежності переміщення поршня від часу подачі повітря при різних вхідних тисках; визначення залежності переміщення поршня від часу стравлювання повітря при різних вхідних тисках; визначення точності позиціонування залежно від вхідного тиску. Ці досліді дають змогу оцінити адекватність роботи позиційного приводу та визначити, чи може цей стенд надалі використовуватися для досліджень, пов’язаних із пневматичним позиційним приводом.

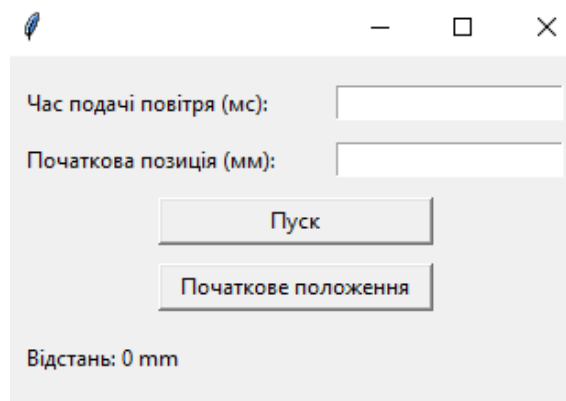


Рис. 5. Програма для проведення досліджень на позиційному пневматичному приводі

Розроблена програма (рис. 5) на Python забезпечує керування стендом і виконання різних експериментів із пневматичним приводом. У графічному інтерфейсі передбачено поле для введення початкового значення датчика, що відповідає нульовому положенню циліндра, а також поле для задання часу подачі або стравлювання повітря залежно від обраного режиму роботи. Поточна відстань, виміряна лазерним датчиком, безперервно відображається у нижній частині вікна програми.

Для керування процесом передбачено дві основні кнопки. Кнопка «Пуск» запускає виконання дослідів за встановленими параметрами, надсилаючи на мікроконтролер команди для перемикання електромагнітних клапанів і запуску руху циліндра. Подача повітря припиняється автоматично через заданий час. Кнопка «Початкове положення» використовується для повернення циліндра у вихідну точку, що дає змогу швидко відновити початковий стан перед наступним експериментом, при необхідності. Програма автоматично обмінюється даними з мікроконтролером через послідовний інтерфейс, отримує поточні покази датчика та керує станами виконавчих елементів. Така функціональність дозволяє використовувати одну програму для різних типів досліджень, включаючи позиціонування, аналіз руху під час подачі та стравлювання повітря.

Висновки

Розроблено та побудовано лабораторний стенд на базі безштокового пневмоциліндра для досліджень енергоефективного пневматичного позиційного приводу.

Стенд дозволяє виконувати експерименти, що оцінюють ефективність алгоритмів керування та точність позиціонування при різних режимах подачі та стравлювання повітря.

Використання стенду дає змогу порівнювати експериментальні результати з математичними моделями, перевіряти їх адекватність та сприяє подальшій оптимізації алгоритмів управління пневматичними приводами.

Список використаної літератури

1. Rivin D. E. Design of precision pneumatic drives // Precision Engineering. 1995. Vol. 17, No. 1. P. 25–34. [in English].
2. Al-Mahmoud A., Zaier A. Pneumatic bellows actuated parallel platform control with adjustable stiffness using a hybrid feed-forward and variable gain I-controller // arXiv preprint. 2023. arXiv:2306.10832. [in English].
3. Qi, H., Bone, G. M., & Zhang, Y. (2019). Position Control of Pneumatic Actuators Using Three-Mode Discrete-Valued Model Predictive Control. *Actuators*, 8(3), 56. DOI: 10.3390/act8030056
4. Deng, L., Li, Z., Liu, X., & Lu, R. (2022). Energy-saving methods in pneumatic actuator stroke using compressed air. *The Journal of Engineering*, 2022, tje2.12000. DOI: 10.1049/tje2.12000
5. Mazare, M.; Taghizadeh, M.; Kazemi, M.G. (2018). Optimal hybrid scheme of dynamic neural network and PID controller based on harmony search algorithm to control a PWM-driven pneumatic actuator position. *J. Vib. Control*, 24, 3538–3554.
6. Hodgson, S.; Tavakoli, M.; Pham, M.T.; Leleve, A. (2015). Nonlinear discontinuous dynamics averaging and PWM-based sliding mode control of solenoid-valve pneumatic actuators. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, 20, 876–888.

References

1. Rivin, D. E. (1995). Design of precision pneumatic drives. *Precision Engineering*, 17(1), 25–34.
2. Al-Mahmoud, A., & Zaier, A. (2023). Pneumatic bellows actuated parallel platform control with adjustable stiffness using a hybrid feed-forward and variable gain I-controller. *arXiv preprint arXiv:2306.10832*.

3. Qi, H., Bone, G. M., & Zhang, Y. (2019). Position Control of Pneumatic Actuators Using Three-Mode Discrete-Valued Model Predictive Control. *Actuators*, 8(3), 56. DOI: 10.3390/act8030056
4. Deng, L., Li, Z., Liu, X., & Lu, R. (2022). Energy-saving methods in pneumatic actuator stroke using compressed air. *The Journal of Engineering*, 2022, tje2.12000. DOI: 10.1049/tje2.12000
5. Mazare, M.; Taghizadeh, M.; Kazemi, M.G. (2018). Optimal hybrid scheme of dynamic neural network and PID controller based on harmony search algorithm to control a PWM-driven pneumatic actuator position. *J. Vib. Control*, 24, 3538–3554.
6. Hodgson, S.; Tavakoli, M.; Pham, M.T.; Leleve, A. (2015). Nonlinear discontinuous dynamics averaging and PWM-based sliding mode control of solenoid-valve pneumatic actuators. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, 20, 876–888.

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

С. Г. КАТРИЧ

аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0006-7964-693X

Д. О. ДМИТРИЄВ

професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-8200-351X

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ 3D ДРУКУ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ У МАШИНОБУДУВАННІ ТА РОБОТОТЕХНІЦІ

В статті розглянуто сучасний стан машинобудування з позиції зростаючих потреб швидкого виготовлення складних і індивідуалізованих конструктивних елементів в робототехніці. Обґрунтовано недоліки традиційних методів таких як механічна обробка, обробка тиском та лиття з точки зору їх обмежень щодо оперативності розробки і варіативності конструкційних рішень складних деталей в приводах та виконавчих елементів промислових роботів маніпуляторів. Зазначено, що адитивні технології тривимірного друку дозволяють подолати ці обмеження, виконати реалізацію складних інженерних концепцій та створення принципово нових типів машин, для розвитку робото-технічної галузі.

На основі аналізу сучасних наукових досліджень низки авторів відзначено впровадження високошвидкісних адитивних процесів як ключового напрямку розвитку сучасного машинобудування, зокрема в сфері робототехніки. Наведено особливості застосування 3D-друку в життєвому циклі виробу від етапу формування концепту до підготовки масового виробництва. Проаналізовано масштаби використання 3D-друку і невирішені технічні задачі якими супроводжуються адитивні технології пов'язані із вибором матеріалів, забезпеченням необхідних механічних характеристик надрукованих елементів та оптимізацією процесів їх постобробки. Особливу увагу в роботі приділено виявленню та систематизації особливостей застосування адитивних технологій для виготовлення деталей у машинобудуванні та робототехніці, а також узагальнення практичних результатів і визначення перспектив подальшого розвитку цієї технології. Детально вивчено основні напрямки використання 3D-друку, зокрема швидке прототипування, виготовлення складно- конфігураційних компонентів, виробництво технологічної оснастки та елементів роботизованих систем. Наведено приклади створення функціональних прототипів із застосуванням високотехнологічних матеріалів та окреслено перспективи тривимірного друку металевих деталей. Окремо проаналізовано сучасні технологічні підходи, включаючи інтеграцію багатокординатних роботизованих комплексів, що забезпечують формування складної геометрії без використання підтримувальних структур і дають змогу виготовляти великогабаритні елементи за один виробничий цикл.

Ключові слова: 3D-друк, адитивні технології, машинобудування, робототехніка, прототипування, композитні матеріали.

S. G. KATRICH

Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics
and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0006-7964-693X

D. O. DMYTRIEV

Professor at the Department of Automation, Robotics
and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-8200-351X

THE SPECIFICS OF APPLYING 3D PRINTING TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING COMPONENTS IN MECHANICAL ENGINEERING AND ROBOTICS

The current state of mechanical engineering from the perspective of the growing needs for rapid manufacturing of complex and individualized structural elements in robotics was examined. The limitations of traditional methods, such as machining, forming, and casting, have been justified with respect to their constraints on development speed and the

variability of design solutions for complex components in drives and actuators of industrial robotic manipulators. It has been noted that additive 3D printing technologies enable these limitations to be overcome, allowing the implementation of complex engineering concepts and the creation of fundamentally new types of machines, contributing to the advancement of the robotics industry.

Based on the analysis of recent scientific studies by various authors, the introduction of high-speed additive processes has been highlighted as a key direction in the development of modern mechanical engineering, particularly in robotics. The features of 3D printing application throughout the product lifecycle, from concept formation to preparation for mass production, was described. The extent of 3D printing utilization and unresolved technical challenges associated with additive technologies have been analyzed, including material selection, ensuring the required mechanical properties of printed elements, and optimization of post-processing procedures. Special attention has been paid to the identification and systematization of the features of additive technology application for component manufacturing in mechanical engineering and robotics, as well as to the generalization of practical results and the definition of prospects for further technology development. Major areas of 3D printing use have been studied in detail, including rapid prototyping, production of complex-configuration components, manufacturing of tooling, and elements of robotic systems. Examples of functional prototype creation using high-performance materials have been provided, and the prospects for 3D printing of metallic components have been outlined. Contemporary technological approaches, including the integration of multi-axis robotic complexes enabling the formation of complex geometries without support structures and allowing large-scale elements to be produced in a single manufacturing cycle, was separately analyzed.

Key words: 3D printing, additive manufacturing, mechanical engineering, robotics, prototyping, composite materials.

Постановка проблеми

Технологія 3D-друку стає важливою складовою сучасного машинобудування та робототехніки. Вона забезпечує гнучкість у проектуванні, скорочує терміни розробки і дозволяє створювати складні деталі без традиційної оснастки. У машинобудуванні її використовують для прототипування, виготовлення оснастки та малосерійних компонентів. У робототехніці 3D-друк сприяє модульності, зменшенню маси конструкцій і швидкій адаптації рішень, вирішує потребу у швидкому створенні складних та індивідуалізованих деталей [1]. Традиційні технології обробки металів (лиття, кування (прокатка), термічна обробка) часто не забезпечують достатньої швидкості розробки та швидкому виготовленню складних конструкцій, оскільки потребують спеціалізованого металургійного обладнання, мають технологічні складнощі, складний процес механічної обробки, високий процент відходів [11]. Адитивні технології (3D-друк) дозволяють долати ці обмеження: вони надають можливість виготовляти деталі складної форми за один цикл, створюючи якісно нові вироби та сприяючи суттєвому розвитку у машинобудуванні [6]. Кількість досліджень у галузі 3D друку та матеріалів для нього в різних країнах світу показує, що впровадження адитивних технологій є одним із найперспективніших напрямів розвитку різних галузей промисловості [5]. Водночас масове використання адитивних технологій у виробництві стикається з низкою проблем: вибором матеріалів для друку, необхідністю забезпечувати високі механічні властивості надрукованих деталей та їх наступну обробку [12]. Ці питання потребують глибокого дослідження і визначають мету даної роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наукові публікації, патенти, матеріали науково-технічних конференцій за останні п'ять років зосереджено на розширенні функціональних можливостей 3D-друку за рахунок інтеграції промислових роботів [4,10] та розробці пристроїв тривимірного друку металами [13]. Відомо, що традиційна адитивна система налагоджена на побудову об'єктів шар за шаром в одній орієнтації, що призводить до анізотропії властивостей матеріалу та зниження міцності деталі. Автори у власних дослідженнях [4] виділяють п'ять ключових можливостей, які відкриває поєднання робототехніки з АМ: багатовимірне друкування (multi-directional), конформне нанесення матеріалу, вбудоване складання префабрикованих компонентів, непідтримуване (supportless) друкування і масштабне друкування великих елементів. Багатоосьові роботизовані системи забезпечують високу гнучкість і просторову свободу, що дозволяє формувати оптимізовані складні геометрії, наносити матеріал по нерівних поверхнях та створювати великогабаритні деталі в одному циклі. Дані технології розширюють сферу застосування АМ за рахунок зниження потреби у підтримках і можливості друку великих непризначених конструкцій. Багато галузей практично демонструють переваги 3D-друку, зокрема, 3D-принтери використовують для швидкого виготовлення запасних частин та деталей оснастки на місці, що скорочує залежність від довгих ланцюгів постачань [9]. Використання 3D-принтерів у робототехніці демонструє нові можливості: наприклад, відкритий гуманоїдний робот Berkeley Humanoid Lite спроектовано з численних модульних надрукованих деталей, що знизило собівартість платформи до \$5,000 та полегшило заміну зношених модулів [14]. Завдяки цьому лабораторні та навчальні роботи зі 3D-друком набувають поширення у застосуванні. Аналіз літературних джерел [1-5] виявляє переваги 3D-друку: комплексність форм, автоматизація, швидкість, індивідуалізація і водночас вказує на потребу в подальших дослідженнях матеріалознавчих особливостей та оптимізації технологічних процесів.

Формулювання мети дослідження

Метою цього дослідження є виявлення та систематизація особливостей використання технології 3D-друку у виготовленні деталей для машинобудування та робототехніки, а також узагальнення результатів її практичного впровадження й визначення перспектив подальшого розвитку.

Викладення основного матеріалу дослідження

У машинобудуванні найбільшого поширення набули такі технології: FDM (Fused Deposition Modeling), SLA (Stereolithography), SLS (Selective Laser Sintering), SLM (Selective Laser Melting) та DMLS (Direct Metal Laser Sintering), також розроблена нова вітчизняна електронно-променева xBeam 3D metal printing технологія [15].

Технологія FDM базується на екструзії термопластичної нитки через нагрітий екструдер, який накладає шари матеріалу відповідно до 3D-моделі. Матеріалом для друку є термопластичні полімери: PLA, ABS, PETG, TPU, а також інженерні полімери нейлон, полікарбонат і композити з наповненням із вуглецевого волокна або металу [2]. Застосування FDM у машинобудуванні охоплює переважно швидке прототипування, виготовлення пристосувань, тестових зразків або оснастки.



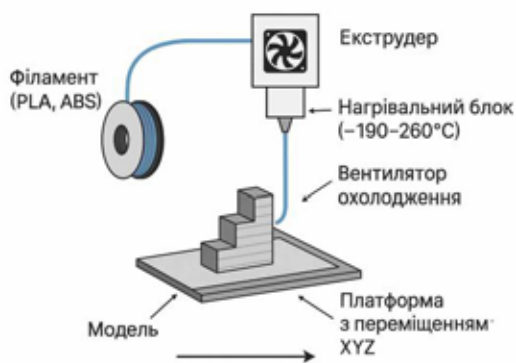
а)



б)

Рис. 1. Приклади деталей надрукованих з PETG-CF матеріалу (а), деталі з композитних філаментів з вуглецевим та скловолоконном (б)

На рис. 2,б наведено принцип адитивного нанесення матеріалу за допомогою 6-осьового роботизованого маніпулятора. Такий підхід дозволяє створювати об'єкти зі складною топографією без необхідності в додаткових опорних структурах. Насадки слідує криволінійній геометрії, забезпечуючи рівномірне нанесення та структурну цілісність. Такі системи уже застосовуються в авіабудуванні, будівництві друк бетонних або полімерних елементів та при створенні великогабаритних об'єктів технічних платформ.



а)



б)

Рис. 2. Базовий принцип роботи FDM-друку (а), 6-осьовий маніпулятор для контурного друку(б)

Найбільш передові технології 3D-друку наведено в таблиці 1. На сьогодні в Україні використовуються для безпосереднього створення металевих деталей. Порошки титану, сталі, алюмінію або кобальтових сплавів плавляються точково лазером, що дозволяє отримати щільні вироби з високою міцністю та точністю. Такі методи часто застосовуються в авіаційній, автомобільній, медичній та оборонній промисловості [6].

Таблиця 1

Порівняння технологій 3D-друку

Критерій	FDM	SLA/DLP	SLS	SLM/DMLS
Точність друку	Низька–середня ($\pm 0,1-0,3$ мм)	Висока ($\pm 0,025-0,1$ мм)	Середня–висока ($\pm 0,1-0,2$ мм)	Дуже висока ($\pm 0,02-0,1$ мм)
Міцність виробів	Помірна (особливо вздовж осі побудови)	Низька–помірна (крихкі смоли)	Висока (пористість помірна)	Дуже висока (аналог металу)
Швидкість друку	Висока (залежить від шару та моделі)	Середня (обмежена об'ємом ванни)	Середня	Низька (тривалий друк)
Вартість обладнання	Низька (\$300–\$10 000)	Середня (\$2 000–\$20 000)	Висока (\$50 000+)	Дуже висока (\$250 000+)
Доступність матеріалів	PLA, ABS, PETG, TPU, інж. полімери	Фотополімери	ПА12, ПА6, армовані полімери	Титан, алюміній, сталь, сплави
Сфера застосування	Прототипи, макети, побутові вироби	Ювелірні вироби, медицина, мікродеталі	Корпуси, шарніри, функціональні деталі	Авіація, авто, оборона, медицина

3D-друк перестав бути інструментом для створення прототипів сьогодні його активно застосовують на всіх етапах життєвого циклу продукту: від початкового проєктування до виготовлення готових деталей у малосерійному або індивідуальному виробництві. Цей підхід є ключовим компонентом концепції цифрового виробництва, яке об'єднує CAD-моделювання, симуляції, адитивне виготовлення і цифрову логістику.

Однією зі сфер використання 3D-друку є створення функціональних та геометричних прототипів, які дозволяють оперативно перевірити конструктивні рішення, здійснити візуальну або ергономічну оцінку деталі. Це значно скорочує цикл розробки продукції, особливо на початкових стадіях, де зміни в конструкції найчастіші [16]. Надруковані вироби повністю замінюють металічні аналоги у середньонавантажених механізмах [17].

У виробництві або при виготовленні унікальних деталей наприклад: заміна зношених частин старого обладнання, які більше не виробляються, виготовлення змінних вставок, кондукторів, фіксаторів, шаблонів, тимчасові технологічні елементи, що використовуються на етапі складання [2]. Це дозволяє уникнути тривалого циклу закупівлі й виробництва стандартних компонентів.

Маса компонентів робота критично впливає на його ефективність, витрати енергії та швидкість реакції. Застосування 3D-друку забезпечує легкі конструкції, що включають внутрішні решітчасті або пустотілі структури. Використання спеціалізованих CAD-систем з топологічною оптимізацією дозволяє генерувати форми, які зберігають необхідну міцність, але при цьому зменшують вагу деталі на 30–60%.

За допомогою 3D-друку:

- проєктуються корпуси з каналами для кабелів або посадочними місцями під компоненти;
- в деяких випадках застосовують друк провідними матеріалами або вставки з металевих контактів;
- створюють герметичні або пило- та вологозахищені оболонки [8].

За допомогою 3D-друку можливе не лише фізичне створення компонентів, а й швидка ітерація та вдосконалення прототипів. Це дозволяє реалізовувати підхід “fail fast – learn fast” (швидка помилка-швидке виправлення), особливо важливий у стартапах і наукових лабораторіях.

Традиційні 3D-принтери працюють у тривимірному просторі, але переважно з обмеженням по вертикальній (Z) осі. Сучасні дослідження ведуть до інтеграції 6-осьових роботизованих рук як платформ для адитивного нанесення матеріалу. Переваги цього підходу:

- можливість друку по нерівних або криволінійних поверхнях;
- безопорне формування без потреби друку підтримуючих структур;
- реалізація контурного або конформного друку нанесення шарів, які повторюють складну форму базової поверхні [3].

Новітні наукові розробки спрямовані на створення багатоматеріальних (композитних, армованих) систем, де в межах однієї деталі поєднуються:

- тверді та еластичні ділянки наприклад, корпус і ущільнювач;
- провідні шари для електроніки;
- магнітні або теплопровідні вклучення.

Таблиця 2

Інноваційні напрями 3D-друку, що перейшли від експериментальних розробок до промислового застосування

<i>Напрямок інновацій</i>	<i>Стан на експериментальному етапі</i>	<i>Стан після промислового впровадження</i>	<i>Приклади застосування / компаній</i>
Металевий 3D-друк для робототехніки	Використання переважно для прототипів	Серійне виготовлення конструктивних частин роботів	Boston Dynamics, ABB, KUKA
Багатоматеріальний полімерний друк	Низька точність і лабораторні зразки	Робочі гнучкі маніпулятори і м'які захвати	Festo, Soft Robotics Inc.
Друк великих конструкцій (LFAM)	Демонстраційні експерименти	Оснастка, матриці, каркаси обладнання	BigRep, BAAM, MasterPrint
Високотемпературні полімери (PEEK/PEKK/Ultem)	Складний контроль умов друку	Функціональні вузли роботів та машин	igus, Schunk
Топологічна оптимізація + АМ	Теоретичні дослідження	Серійні деталі складної геометрії	Airbus, GE Aviation
Адитивно виготовлена електроніка (AME)	Експериментальні схеми	Вбудовані сенсори та 3D-електроніка	Nano Dimension
Друк з безперервним вуглеволокном	Демонстраційні елементи	Силові конструкції, що замінюють метал	Markforged, Anisoprint
Багатокомпонентні друковані роботи	Академічні прототипи	Комерційні роботизовані платформи	Berkeley Humanoid Lite
Вбудовані канали в деталях	Концептуальні моделі	Функціональні пневмо- та рідинні канали	Роботи для harsh-environment
Гібридне виробництво (AM + CNC)	Лабораторні установки	Серійне виготовлення великогабаритних деталей	DMG MORI, Mazak

Запропоновано (рис. 3,а) принципову схему роботизованого інтелектуального 3D-принтеру для комбінованого друку. В центрі прямокутного чотиригранного каркасу 1 розташований нерухомий робочий стіл 2 з деталлю, що друкується 3. На чотирьох вертикальних стійках каркасу 1 розташовано незалежні програмно-керовані приводи поступального руху 4, які шарнірно з'єднані штангами 5 з рухомою платформою, що містить друкарську головку 6 та позиціонується в робочій зоні уздовж трьох координат X, Y, Z. В поперечному перетині прямокутного каркасу 1 розташовано кільцеву напрямну 7, що має здатність програмно-керованого руху вертикально уздовж координати Z спареними приводами поступального руху 8, що працюють одночасно уздовж вертикальних стійок каркасу 1. На кільцевій напрямній 7 змонтовано незалежні програмно-керовані приводи поступового руху 9, які шарнірно-зв'язані штангами 10 з маніпулятором із захоплювачем 11, що позиціонується завдяки приводам поступового руху 9 в робочій зоні укладання шарів по двом координатам X та Y. Опозитно до механізмів позиціонування маніпулятора із захоплювачем 11 на кільцевій напрямній 7 змонтовано незалежні програмно-керовані приводи поступового руху 12, які шарнірно-зв'язані штангами 13 з локальним пристроєм підігріву/охолодження 14, що позиціонується завдяки приводам поступового руху 12 в робочій зоні укладання шарів по двом координатам X та Y. В свою чергу приводи поступового руху 9 і 12 можуть позиціонувати пристрій підігріву/охолодження 14 та маніпулятор із захоплювачем 11 по кільцевій напрямній 7 навколо осі Z в системі координат деталі на 360 градусів. Приводи 8 рухають кільцеву напрямну вертикально впродовж вертикальних стійок каркасу, таким чином робоча зона має циліндричну форму.

Для забезпечення постійного зворотного зв'язку в режимі реального часу передаються дані про температуру та геометричні параметри в інтелектуальну систему числового програмного керування від двох тепловізорів 15 і двох просторових датчиків 16, що розміщені в основі каркасу з двох боків на рівні деталі, яка друкується. Тепловізори 15 і просторові датчики 16 розташовано окремо таким чином щоб отримати дані по координаті X та Y в робочій зоні роботизованого інтелектуального 3D-принтеру. Друкарська головка 6 формує шари виробу, пристрій локального підігріву/охолодження 13 коригує температурне поле в зоні друку, маніпулятор 11 із захоплювачем може здійснювати локальні операції з переміщення додаткових елементів таких як укладання армованих елементів в дефектні області, очищення робочої області і інше.

Запропоновано (рис. 3, б, в) принципову схему роботи нового принтера, де 1-робоча зона для 3D друку і 2 – для механічної постобробки, робочий стіл 3 з підігрівом, деталь 4, стійки каркасу 5, приводи лінійного руху 6, 7, крокові двигуни 8, 9, штанги постійної довжини 10, 11, рухома платформа 12, на якій розташовано головку для друку 13. Робоча зона 1 має активну або пасивну термокамеру 14, стінки якої розташовано між стійками каркасу 5. Робоча зона 2 є відкритою і призначена для механічної пост обробки надрукованої деталі або проміжної обробки елементів деталі 4 під час друку, містить стійки каркасу 15, 16, окремі приводи лінійного руху 17, 18 і відповідні їм крокові двигуни 19, 20, штанги постійної довжини 21, 22 шарнірно з'єднані з приводами лінійного руху 17, 18 відповідно та рухомою платформою 23, на якій розташовано інструментальний шпіндель 24. В робочій зоні 2 розташовано магазин інструментів для механічної обробки 25 та маніпулятор заміни інструменту 26

в шпинделі 24. Переміщення деталі 4 із робочої зони 1 після циклу друку в робочу зону 2 для механічної обробки відбувається за допомогою пристрою обертання 27 робочого столу 3. Механічна обробка деталі 4 в робочій зоні 2 відбувається інструментальним шпинделем 24 на рухомій платформі 23 знизу у вертикальному положенні. Для надійного закріплення деталі в робочій зоні 2 можуть бути використані самоцентруючі машинні лещата 28. З технологічної точки зору багатофункціональний 3D-принтер може об'єднувати окремі переходи 3D друку та механічної постобробки на одній деталі або виконувати окремо операції 3D друку та механічної постобробки для різних деталей 4. Таким чином забезпечується повний цикл комплексної автоматизованої обробки деталей складної геометрії включаючи переходи та операції механічної постобробки.

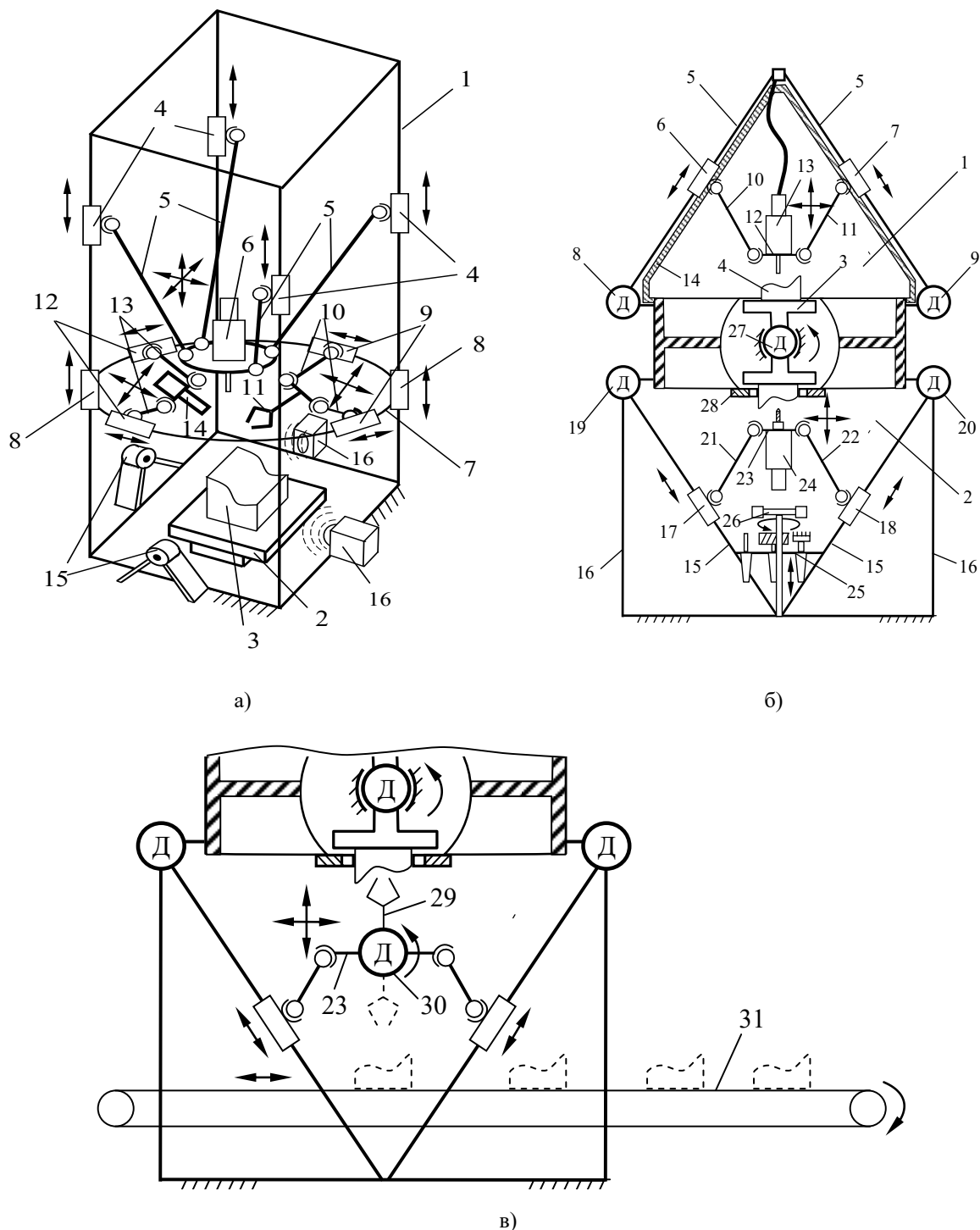


Рис. 3. Принципова схема роботизованого інтелектуального 3D принтера для комбінованого друку (а), принципова схема багатофункціонального 3d-принтера з можливістю пост обробки (б, в)

Висновки

Застосування адитивних технологій значно підвищує гнучкість і швидкість інженерного циклу, дозволяючи створювати легкі, міцні та геометрично складні конструкції, які є недоступними або економічно неефективними для традиційних методів виробництва. Наведено нові технічні рішення на рівні принципових схем 3D-принтерів за рахунок вдосконалення кінематичних властивостей самонавчального пристрою для комбінованого друку об'єктів, а саме забезпечення синхронного керованого впливу кількох різних рухомих локальних пристроїв в одній робочій зоні під час пошарового формування складних виробів, розширення функціональних можливостей за рахунок поєднання кінематичних рухів різних пристроїв, усунення температурних деформацій, підвищення якості друку складних виробів шляхом локального теплового регулювання та взаємодії з маніпулятором, оптимізація робочої зони. Наступною пропозицією є компоновка багатофункціонального 3D-принтера для забезпечення повного циклу комплексної автоматизованої обробки деталей складної геометрії включаючи переходи та операції механічної постобробки, що досягається розділенням робочих зон і виконавчих органів 3D друку та механічної постобробки в межах каркасу стійок несучої основи із застосуванням приводів виконавчих органів у вигляді механізмів паралельної структури та поворотного пристрою переміщення робочого столу з деталлю між робочими зонами.

Список використаної літератури

1. Zhou L., Miller J., Vezza J., Mayster M., Raffay M., Justice Q., Al Tamimi Z., Hansotte G., Sunkara L. D., Bernat J. Additive manufacturing: A comprehensive review // *Sensors* (Basel, Switzerland). 2024. Vol. 24, No. 9. P. 2668. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24092668>. 1
2. Поліщук О. С., Поліщук А. О., Лісевич С. П., Залізецький А. М., Мельник В. І. Виготовлення виробів та деталей методом 3D-друку з композитних ниток з високим вмістом металу. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. № 3. С. 104–110. DOI: 10.31891/2307-5732-2022-309-3-104-110.
3. Рибак А. І., Шевченко І. В. Застосування адитивних технологій у процесі проектування виробів машинобудування. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2021. № 1(20). С. 85–91.
4. Bhatt P. M., Malhan R. K., Shembekar A. V., Yoon Y. J., Gupta S. K. Expanding capabilities of additive manufacturing through use of robotics technologies: A survey. *Additive Manufacturing*. 2019. Vol. 31. Art. 100933. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100933.
5. Brasil A. L. A., Martinez A. C. P. A Systematic Review of Robotic Additive Manufacturing Applications in Architecture, Engineering, and Construction. *Buildings*. 2025. Vol. 15, № 18. Art. 3336. DOI: 10.3390/buildings15183336.
6. Gao W., Zhang Y., Ramanujan D., Ramani K., Chen Y., Williams C. B., Wang C. C. L., Shin Y. C., Zhang S., Zavattieri P. D. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*. 2015. Vol. 69. P. 65–89. DOI: 10.1016/j.cad.2015.04.001.
7. Gibson I., Rosen D. W., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. 2nd ed. New York: Springer, 2015. 498 p. DOI: 10.1007/978-1-4939-2113-3.
8. Horváth L., Váradi K., Szalay T. Toolpath planning for large-scale FDM 3D printing: Strategies and implementation. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. Vol. 64. P. 1280–1290. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.02.039.
9. SPEE3D. Expeditionary Manufacturing Unit [Електронний ресурс]. 2025. Режим доступу: <https://www.spee3d.com/product/emu/>
10. Самонавчальний 3D-принтер для комбінованого друку об'єктів : пат. UA 154212 U / Дудукалов Ю. В., Глушкова Д. Б., Сорокін В. Ф., Демченко С. В. Зареєстр. 19.10.2023. "Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій".
11. Єфременко Б. В., Журнаджи В. І., Зайчук Н. П., Шимчук С. П., Чабак Ю. Г., Петришинець І., Єфременко В. Г. Мікробудова та властивості сталі AISI 316L біомедичного призначення, виготовленої методом LPBF-друку // Наукові нотатки: міжвузівський збірник наукових праць. Луцьк, 2022. № 73. DOI: 10.36910/775.24153966.2021.72.13.
12. Цибуленко В. О., Воронцов Б. С. Забезпечення контролю якості для традиційного і адитивного виробництва // Матеріали XXIV Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (28–29 листопада 2024 р., Київ). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. DOI: 10.20535/2409-7160.2023.XXIII.278009.
13. Ковальчук Д. В., Мельник В. Г., Мельник І. В., Тугай Б. А. Спосіб виготовлення тривимірних об'єктів і пристрій для його реалізації : пат. UA 112682 C2 Україна. заявл. 10.10.2016 ; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 19. 6 с.
14. University of California, Berkeley. Berkeley engineers develop customizable 3D-printed robot for tech newbies [Електронний ресурс] // *Berkeley Engineering*. Червень 2025. Режим доступу: <https://engineering.berkeley.edu/news/2025/06/berkeley-engineers-develop-customizable-3d-printed-robot-for-tech-newbies/> (дата звернення: 21.11.2025).
15. Ковальчук Д. В., Мельник В. Г., Мельник І. В., Тугай Б. А. Технологія xBeam 3D Metal printing на шляху до промислового виробництва // Сучасна електрометалургія. 2020. № 3. ISSN 2415-8445.
16. Зінченко Д. Ю. Можливості гібридних технологій друку для виробництва функціональних прототипів. *Тези доп. Міжнар. наук.-практ. конф. "Інновації в промисловому виробництві"*. Київ, 2023. С. 67–69.

17. Automotive Manufacturing Solutions. From prototype to production: Bringing 3D printed jigs and fixtures in-house [Електронний ресурс]. 2018. Режим доступу: <https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/equipment-and-technology-providers/from-prototype-to-production/533007>

References

1. Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., Al Tamimi, Z., Hansotte, G., Sunkara, L. D., & Bernat, J. (2024). Additive manufacturing: A comprehensive review. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 24(9), 2668. <https://doi.org/10.3390/s24092668>
2. Polishchuk, O. S., Polishchuk, A. O., Lisevych, S. P., Zalizetskyi, A. M., & Melnyk, V. I. (2022). Vyhотовlennia vyrobiv ta detalei metodom 3D-druku z kompozytnykh nytok z vysokym vmistom metalu [Manufacturing of products and parts by 3D printing from composite filaments with high metal content]. *Visnyk Khmelnytskoho Natsionalnoho Universytetu*, 3, 104–110. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-309-3-104-110>
3. Rybak, A. I., & Shevchenko, I. V. (2021). Zastosuvannia adytyvnykh tekhnolohii u protsesi proektuvannia vyrobiv mashynobuduvannia [Application of additive technologies in the design of mechanical engineering products]. *Visnyk Mashynobuduvannia ta Transportu*, 1(20), 85–91.
4. Bhatt, P. M., Malhan, R. K., Shembekar, A. V., Yoon, Y. J., & Gupta, S. K. (2019). Expanding capabilities of additive manufacturing through use of robotics technologies: A survey. *Additive Manufacturing*, 31, 100933. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100933>
5. Brasil, A. L. A., & Martinez, A. C. P. (2025). A systematic review of robotic additive manufacturing applications in architecture, engineering, and construction. *Buildings*, 15(18), 3336. <https://doi.org/10.3390/buildings15183336>
6. Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., Zhang, S., & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*, 69, 65–89. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
7. Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015). *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
8. Horváth, L., Váradi, K., & Szalay, T. (2021). Toolpath planning for large-scale FDM 3D printing: Strategies and implementation. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 1280–1290. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.039>
9. SPEE3D. (2025). *Expeditionary manufacturing unit*. <https://www.spee3d.com/product/emu/>
10. Dudukalov, Yu. V., Hlushkova, D. B., Sorokin, V. F., & Demchenko, S. V. (2023). Samonavchal'nyi 3D-prynter dlia kombinovanoho druku ob'ektiv [Self-learning 3D printer for combined printing of objects] (Patent UA 154212 U). Ukrainskyi Natsionalnyi Ofis Intelktualnoi Vlasnosti ta Innovatsii.
11. Yefremenko, B. V., Zurnadzi, V. I., Zaichuk, N. P., Shymchuk, S. P., Chabak, Yu. H., Petryshynets, I., & Yefremenko, V. H. (2022). Mikrobudova ta vlastyvoli stali AISI 316L biomedychnoho pryznachennia, vyhotovlenoi metodom LPBF-druku [Microstructure and properties of AISI 316L biomedical steel produced by LPBF printing]. *Naukovi Notaiky*, 73. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2021.72.13>
12. Tsybulenko, V. O., & Vorontsov, B. S. (2024). Zabezpechennia kontroliu yakosti dlia tradytsiinoho i adytyvnoho vyrobnytstva [Ensuring quality control for traditional and additive manufacturing]. In *Proceedings of the XXIV International Scientific and Technical Conference "Progressive Engineering, Technology and Education"* (pp. 278009). Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. <https://doi.org/10.20535/2409-7160.2023.XXIII.278009>
13. Kovalchuk, D. V., Melnyk, V. H., Melnyk, I. V., & Tuhai, B. A. (2016). Sposib vyhotovlennia tryvymirnykh ob'ektiv i prystroi dlia yoho realizatsii [Method of manufacturing three-dimensional objects and device for its implementation] (Patent UA 112682 C2).
14. University of California, Berkeley. (2025, June). Berkeley engineers develop customizable 3D-printed robot for tech newbies. *Berkeley Engineering*. <https://engineering.berkeley.edu/news/2025/06/berkeley-engineers-develop-customizable-3d-printed-robot-for-tech-newbies/>
15. Kovalchuk, D. V., Melnyk, V. H., Melnyk, I. V., & Tuhai, B. A. (2020). Tekhnolohiia xBeam 3D Metal printing na shliakhu do promyslovoho vyrobnytstva [xBeam 3D Metal printing technology on the way to industrial production]. *Suchasna Elektrometalurhiia*, 3. ISSN 2415-8445.
16. Zinchenko, D. Yu. (2023). Mozhlyvosti hibrydnykh tekhnolohii druku dlia vyrobnytstva funktsional'nykh prototypiv [Possibilities of hybrid printing technologies for the production of functional prototypes]. In *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Innovations in Industrial Production"* (pp. 67–69). Kyiv.
17. Automotive Manufacturing Solutions. (2018). From prototype to production: Bringing 3D printed jigs and fixtures in-house. <https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/equipment-and-technology-providers/from-prototype-to-production/533007>

Дата першого надходження рукопису до видання: 12.11.2025
 Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 09.12.2025
 Дата публікації: 31.12.2025

В. І. КИРНАЦ

кандидат технічних наук,
доцент кафедри суднових енергетичних установок
і технічної експлуатації

Одеський національний морський університет

ORCID: 0000-0002-8308-7994

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ СУДЕН НА ОРГАНІЗАЦІЮ МАШИННОЇ ВАХТИ

У сучасній транспортній системі якість організації машинної вахти безпосередньо впливає на безпеку та ритмічність перевізного процесу, особливо в умовах мультимодальних перевезень, де морський сегмент має бути узгоджений із вимогами портів інфраструктур, логістичних операторів і міжнародних регуляторів. Конструктивні та технологічні особливості різних типів суден (контейнеровозів, балкерів, танкерів і газовозів) формують різні моделі технічного навантаження на екіпаж, що підсилюється потребою дотримання міжнародних екологічних і безпекових норм. Метою статті є формування рекомендацій щодо вдосконалення організації машинної вахти з урахуванням конструктивно-технологічних параметрів морських суден, особливостей їх експлуатації і ролі у мультимодальних ланцюгах постачання. Методологічну основу дослідження становлять порівняльний аналіз технічних характеристик енергетичних установок, структурно-функціональний підхід до оцінювання вахтових процесів, а також критичний огляд нормативних вимог, що регламентують діяльність машинної команди в міжнародному та національному морському праві. Отримані результати демонструють, що конструктивні рішення (тип двигуна, архітектура енергетичної установки, спеціалізовані вантажні системи) безпосередньо визначають інтенсивність контролю та профілактики, яку здійснює машинна вахта, тоді як логістичні умови мультимодальних перевезень формують вимоги до точності виконання процедур, синхронізації із портовими розкладами та підтримання технічної готовності судна. Сформовані рекомендації охоплюють напрями посилення профілактичного контролю, оптимізації взаємодії між машинною вахтою та логістичними службами, а також модернізації процедур відповідно до вимог технічного регулювання. Узагальнення результатів дозволяє стверджувати, що ефективне управління машинною вахтою можливе лише за умови інтеграції технічних, нормативних і логістичних чинників в єдиний механізм організації вахтової діяльності. Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням цифрових інструментів для моніторингу технічних параметрів, оцінюванням ризиків відмов у мультимодальних ланцюгах і розширенням практик інтеграції логістичних і технічних систем управління вахтовою діяльністю.

Ключові слова: транспортна система, машинна вахта, мультимодальні перевезення, нормативно-правове регулювання, конструктивні особливості суден, технічна експлуатація.

V. I. KYRNATS

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Ship Power Plants
and Technical Operation
Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0002-8308-7994

THE INFLUENCE OF STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL FEATURES OF SHIPS ON THE ORGANIZATION OF THE ENGINE WATCH

In the modern transport system, the quality of the engine watch organization directly affects the safety and rhythm of the transportation process, especially in multimodal transportation conditions, where the maritime segment must be coordinated with the requirements of port infrastructures, logistics operators and international regulators. The design and technological features of different types of vessels (container ships, bulk carriers, tankers and gas carriers) form different models of technical load on the crew, which is reinforced by the need to comply with international environmental and safety standards. The aim of the article is to formulate recommendations for improving the engine watch organization, taking into account the design and technological parameters of seagoing vessels, the features of their operation and their role in multimodal supply chains. The methodological basis of the study is a comparative analysis of the technical characteristics of power plants, a structural and functional approach to assessing watch processes, as well as a critical

review of the regulatory requirements that regulate the activities of the engine team in international and national maritime law. The results obtained demonstrate that design solutions (engine type, power plant architecture, specialized cargo systems) directly determine the intensity of control and prevention carried out by the engine watch, while the logistical conditions of multimodal transportation form the requirements for the accuracy of procedures, synchronization with port schedules and maintaining the technical readiness of the vessel. The recommendations formed cover the areas of strengthening preventive control, optimizing interaction between the engine watch and logistics services, as well as modernizing procedures in accordance with the requirements of technical regulation. The generalization of the results allows us to state that effective engine watch management is possible only if technical, regulatory and logistical factors are integrated into a single mechanism for organizing watch activities. Prospects for further research are related to the improvement of digital tools for monitoring technical parameters, assessing the risks of failures in multimodal chains and expanding the practices of integrating logistical and technical systems for managing watch activities.

Key words: transport system, engine watch, multimodal transportation, regulatory and legal regulation, design features of vessels, technical operation.

Постановка проблеми

Ефективна організація машинної вахти залишається ключовою умовою безпечної експлуатації сучасних суден різних типів: контейнеровозів, балкерів, танкерів і газозовів. Кожен із цих класів має специфічні конструктивні та технологічні особливості, що по-різному впливають на роботу енергетичних установок і навантажувальні режими механізмів. Наприклад, на контейнеровозах спостерігаються суттєві коливання навантаження під час маневрування, тоді як танкери та газозови працюють у жорстких вимогах до надійності та безперервної роботи допоміжних систем. Такі відмінності визначають потребу в підготовлених фахівцях, здатних адаптувати вахтові процедури до конкретного судна, що підтверджує значущість безперервної професійної освіти механіків [1, с. 21–23].

Технічні системи суден є складними та чутливими до режимів роботи, а відхилення в параметрах мащення здатні знижувати стабільність і ресурс механізмів [2, с. 92–94]. Це вимагає постійного контролю стану вузлів у різних навантажувальних профілях, адже на балкерах пріоритетним є стримування зношування та нагляд за охолодженням, тоді як на контейнеровозах критичною стає змінність навантажень. Точність дій вахтової зміни має вирішальне значення, оскільки організаційні помилки можуть спричинити небезпечні відхилення [3, с. 52–53], що особливо загрозливо для танкерів і газозовів, де ризики пов'язані з вибухонебезпечним вантажем.

Удосконалення систем вахтової діяльності є також відповіддю на виклики, сформовані сучасними тенденціями підвищення потужності суднових силових установок і посиленням норм щодо екологічної безпеки. Зростання рівня вібраційних навантажень, що спостерігається в роботі сучасних суднових механізмів, зменшує ресурс обладнання та підвищує потребу в інженерних рішеннях, спрямованих на зниження вібрації [4, с. 129–131]. Враховуючи, що різні типи суден мають різні джерела вібрацій і різну конфігурацію технічних приміщень, оптимізація машинної вахти потребує індивідуального підходу. Саме тому дослідження впливу конструктивних і технологічних характеристик суден на організацію машинної вахти має важливе наукове та практичне значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження організації машинної вахти в сучасних умовах функціонування транспортної системи демонструють значне розширення наукових підходів. У свою чергу, В. Сорока, О. Мельник та І. Довгаль детально проаналізували змащувальні властивості палив [5], тоді як В. Свиридов, А. Андреев та А. Андреев дослідили вплив вібрацій на ресурс суднових машин [4].

Значний внесок у розвиток морських транспортних технологій зробили С. Голубєва та О. Гороховська, які побудували динамічну модель дизель-електричної установки з уніполярними машинами [6]. Їхні результати демонструють важливість урахування перехідних процесів під час несення вахти на суднах зі змінною навантаження. Натомість, С. Сагін, Ю. Заблоцький та А. Сагін досліджують можливості підвищення економічності середньооборотних дизелів у контексті сучасної екологічної політики та цифрової модернізації технічного контролю [7].

По напрямку дослідження шумів і вібрацій М. Парк (M. Park) та ін. проаналізували технології зниження шуму в машинних відділеннях, однак їхні рекомендації частково не узгоджені з міжнародними стандартами безпеки [8]. Технічні аспекти роботи насосного обладнання детально розглядають В. Цао (W. Cao), Х. Ванг (H. Wang) та Ц. Танг (J. Tang), застосовуючи CFD–DEM-моделювання для оцінки зношування прямої апарата відцентрових насосів [9]. У статті Х. Ванг (H. Wang) та ін. викладені результати дослідження матеріалів та покриттів, що підвищують довговічність поршневих насосів і покращують триботехнічні властивості вузлів [10].

Проблеми, пов'язані з обростанням ґрат морської води, вивчали Б. Сейлан (B. Ceylan) та ін., які застосували метод аналізу видів і наслідків відмов (Failure Mode and Effects Analysis, FMEA) та метод оцінювання ризиків (Evaluation and Ranking System, ERS) для визначення ступеня впливу забруднення на роботу систем охолодження [11]. У роботі О. Інал (Ö. İnal) та Г. Кочак (G. Koçak) досліджено застосування приводу змінної частоти (Variable Frequency Drive, VFD) у системах вентиляції машинного відділення й обґрунтовано його

енергоефективність [12]. Алгоритми машинного навчання для діагностики відмов дизелів розробили Г. Кочак (G. Kosak), В. Гекчек (V. Gokcek) та Й. Генч (Y. Genc), що демонструє важливий напрям у цифровізації технічного обслуговування [13]. Варто відмітити працю дослідників Х. Гаріб (H. Gharib) та Г. Ковач (G. Kovacs), які порівнюють надійність морських і промислових дизелів, підкреслюючи унікальність режимів роботи суднових силових установок [14].

Попри значний прогрес, у дослідженнях все ще відсутня комплексна оцінка впливу конструктивних і технологічних особливостей різних типів суден на організацію машинної вахти в умовах мультимодальних перевезень та гармонізації нормативно-правових вимог. Також недостатньо вивчено інтеграцію технічних характеристик суден у стандарти транспортної політики ЄС і міжнародні регламенти.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є встановлення впливу конструктивних і технологічних особливостей різних типів суден на організацію машинної вахти з урахуванням вимог мультимодальних перевезень і нормативно-правового регулювання перевізного процесу. Для досягнення мети визначено наступні завдання: 1) дослідити конструктивні та технологічні характеристики основних типів суден і їх вплив на специфіку машинної вахти; 2) проаналізувати нормативно-правові вимоги і логістичні умови мультимодальних перевезень, що визначають особливості організації вахтової діяльності; 3) сформулювати рекомендації щодо удосконалення організації машинної вахти з урахуванням технічних особливостей суден.

Викладення основного матеріалу дослідження

Різні типи морських транспортних суден (контейнеровози, балкери, танкери, газозови) мають відмінні конструктивні та технологічні параметри, що по-різному впливають на режими роботи енергетичних установок і вимоги до машинної вахти. На контейнеровозах високопотужні низькообертові дизелі та часті маневри зумовлюють значні коливання навантаження, тому навіть незначні порушення режимів мащення й охолодження можуть призвести до нестабільної роботи вузлів, особливо під час інтенсивних розворотів судна. Для балкерів характерні тривалі переходи в усталених режимах, що посилює значення контролю зношування і теплового стану механізмів, а також залежності ресурсу від властивостей палива та мастильних матеріалів.

Танкери, обладнані подвійним корпусом, інертними газовими системами та потужними насосами, працюють у жорстких умовах безпеки, оскільки будь-яка відмова під час вантажних операцій може перетворитися на аварію, що зумовлює необхідність безперервного контролю і точного дотримання процедур вахтовою зміною. Газозови з криогенними танками та двопаливними або дизель-електричними установками потребують інтегрованого спостереження за енергетичною і вантажною системами, включно з вібраційними навантаженнями, які впливають на залишковий ресурс обладнання. Це підсилює вимоги до спеціалізованої і неперервної підготовки суднових механіків, здатних адаптувати вахтові процедури до конкретного типу судна [1, с. 21–23; 3, с. 51–53]. Узагальнена характеристика конструктивно-технологічних відмінностей основних типів суден та їх впливу на організацію машинної вахти подана в таблиці 1.

Таблиця 1

Основні конструктивні та технологічні особливості типів суден і їхній вплив на організацію машинної вахти

Тип судна	Ключові конструктивні та технологічні характеристики	Вплив на організацію машинної вахти
Контейнеровоз	Потужні низькообертові двигуни, часті маневри, значні коливання навантаження	Швидке реагування на перехідні режими, контроль мастила / температур, моніторинг генераторів
Балкер	Велика вантажопідйомність, довгі усталені переходи, повільні маневри	Профілактика зношування, стабільний контроль охолодження, регулярна діагностика механізмів
Танкер	Подвійний корпус, інертна газова система, потужні насосні комплекси	Суворе дотримання регламентів, безперервна вахта при вантажних операціях, контроль резервних систем
Газовоз	Криогенні танки, двопаливні / електричні установки, системи реліквідації випарів	Інтегрований моніторинг двигунів і кріосистем, контроль тиску/температур, висока кваліфікація механіків

Джерело: узагальнено автором на основі даних [1, с. 21–23; 3, с. 51–53; 14; 15; 16].

Нормативно-правові вимоги, екологічні стандарти та логістичні умови мультимодальних перевезень визначають рамки, в яких функціонує машинна вахта, впливаючи на режими роботи силових установок і характер технічного контролю. Міжнародні конвенції, зокрема STCW і MARPOL, встановлюють кваліфікаційні вимоги до персоналу і регламентують режими роботи двигунів, що зумовлює додаткові процедурні дії, включаючи перехід на палива з низьким вмістом сірки та ведення журналів викидів [2, с. 97–99; 7, с. 170–173; 17]. Державне регулювання технічного обслуговування (наприклад, вимога дотримання графіків ремонту) розглядається як інструмент забезпечення безперервності перевізного процесу, що покладає на машинну вахту обов'язок планувати профілактику відповідно до логістичних строків.

У мультимодальних ланцюгах порушення графіку руху судна здатне спричинити збої у перевалці вантажів між видами транспорту, тому вахтові інженери мають забезпечувати пріоритетний моніторинг технічного стану для запобігання простою. Методики оцінки ризиків, такі як FMEA, демонструють можливість кількісного визначення критичних вузлів, відмова яких може зупинити судно, зокрема систем охолодження або морських ґрат. Застосування таких підходів дозволяє коригувати регламенти вахти, а саме встановлювати підвищену частоту оглядів або вводити додаткові точки контролю.

В умовах цифровізації та інтенсифікації міжнародного співробітництва морські перевізники все частіше взаємодіють із портовими системами у форматі обміну даними (Port Community Systems). Це потребує від машинної вахти завчасної передачі інформації про технічний стан судна, що є необхідною умовою роботи в режимах «Just-In-Time Arrival» (JIT, прибуття «точно та вчасно»), які поширюються в європейських портах [16]. Гармонізація стандартів безпеки й екологічних норм відповідно до вимог ЄС також потребує адаптації національних процедур технічного контролю та оновлення вахтових інструкцій. Узагальнення ключових нормативних і логістичних чинників, що впливають на організацію машинної вахти, подано в таблиці 2.

Таблиця 2

Нормативні та логістичні чинники, що формують вимоги до машинної вахти

Тип судна	Ключові конструктивні та технологічні характеристики	Вплив на організацію машинної вахти
Контейнеровоз	Потужні низькообертові двигуни, часті маневри, значні коливання навантаження	Швидке реагування на перехідні режими, контроль мастила / температур, моніторинг генераторів
Балкер	Велика вантажопідйомність, довгі усталені переходи, повільні маневри	Профілактика зношування, стабільний контроль охолодження, регулярна діагностика механізмів
Танкер	Подвійний корпус, інертна газова система, потужні насосні комплекси	Строге дотримання регламентів, безперервна вахта при вантажних операціях, контроль резервних систем
Газовоз	Кріогенні танки, двопаливні / електричні установки, системи реліквідації випарів	Інтегрований моніторинг двигунів і кріосистем, контроль тиску/температур, висока кваліфікація механіків

Джерело: узагальнено автором на основі даних [2, с. 97–99; 7, с. 170–173; 9; 10; 16].

Вимоги до машинної вахти залежать від типу суден, тому рекомендації мають враховувати різні конструктивні особливості енергетичних установок і логістичні умови мультимодального перевізного процесу. Поеднання технічного контролю з управлінням ризиками та міжнародними стандартами безпеки дозволяє своєчасно виявляти відхилення і підвищувати стійкість механізмів до навантажувальних змін. Для контейнеровозів доцільним є розширення моніторингу температури та тиску в системах охолодження, для балкерів – регулярний аналіз мастил і вібрацій, для танкерів – дублювання насосних агрегатів у небезпечних режимах, а для газовозів – систематичний контроль кріогенних параметрів і компресорних установок.

Узгодження організації вахти з нормативними та логістичними вимогами включає використання цифрових платформ для синхронізації технічного стану судна з графіками портів і впровадження уніфікованих протоколів, що відповідають нормам Міжнародної морської організації (ММО) та директивам ЄС. Підвищення кваліфікації персоналу, зокрема у сфері автоматизованої діагностики та роботи з оновленими інструкціями, є ключовим елементом ефективної вахти, особливо з огляду на специфіку різних типів суден. Сформовані рекомендації представлено в таблиці 3.

Таблиця 3

Рекомендації щодо удосконалення організації машинної вахти

Напрямок удосконалення	Зміст рекомендацій	Зв'язок із технічними особливостями суден
Профілактичний контроль	Додаткові датчики температури/тиску, аналіз мастил та вібрацій, моніторинг кріосистем	Враховує змінні режими контейнеровозів, тривалі переходи балкерів, високі ризики танкерів та кріогенні системи газовозів
Нормативно-логістична узгодженість	Уніфіковані протоколи вахти; інтеграція з портовими системами JIT, дотримання екологічних вимог	Підтримує точність графіку в мультимодальних перевезеннях та відповідність стандартам ММО/ЄС
Підготовка персоналу	Спеціалізовані курси, робота з автоматизованими діагностичними системами, оновлення вахтових інструкцій	Забезпечує коректне реагування механіків на специфіку кожного типу суден

Джерело: власна розробка автора.

Висновки

Морський транспорт дедалі глибше інтегрується у мультимодальні ланцюги постачання, тому організація машинної вахти перестає бути суто технічною процедурою та набуває рис комплексного управлінського процесу,

що враховує конструктивні особливості суден, нормативно-правові обмеження та логістику перевізного процесу. Поєднання цих чинників формує нове бачення експлуатації енергетичних установок, в якому технічна надійність стає невіддільною від вимог міжнародної безпеки та транспортної політики.

У дослідженні встановлено, що конструктивно-технологічні характеристики контейнеровозів, балкерів, танкерів і газозовів суттєво диференціюють зміст і пріоритети машинної вахти від управління перехідними режимами на швидкохідних суднах до контролю кріогенних систем і насосних комплексів на спеціалізованих танкерах та газозовах. Проаналізовано, що нормативно-правові вимоги міжнародних конвенцій і державних регламентів, а також логістичні умови мультимодальних перевезень визначають рамки, в яких функціонує вахтовий персонал, впливають на вибір експлуатаційних режимів і структуру профілактичного контролю. Сформовані рекомендації демонструють можливість удосконалення вахтової діяльності шляхом інтеграції ризик-орієнтованого моніторингу, уніфікованих процедур, цифрових систем обміну даними та спеціалізованої підготовки механіків з огляду на конструктивні відмінності суден.

Отримані результати можуть бути застосовані під час розроблення національних керівних документів з організації машинної вахти, оновлення програм підготовки морських інженерів, а також при адаптації судноплавних компаній до стандартів ЄС у сфері мультимодальних перевезень і цифрової логістики. Практична цінність дослідження полягає в поєднанні технічних і нормативно-логістичних аспектів, що дозволяє використовувати ці висновки як основу для оптимізації експлуатаційної діяльності флоту. Подальші дослідження доцільно зосередити на кількісному оцінюванні ефекту запропонованих рекомендацій, розробленні моделей прогнозування технічного стану двигунів у мультимодальних перевізних мережах, а також на аналізі того, як нові вимоги екологічної політики та цифровізації впливатимуть на структуру машинної вахти в найближчі роки.

Список використаної літератури

1. 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. DOI: <https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series5.2024.101.04> (дата звернення: 19.11.2025).
2. Столярик Т. Забезпечення режимів мащення суднових чотиритактних дизелів. *Автоматизація суднових технічних засобів*. 2023. № 28. С. 90–105. DOI: <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2023-1-28-90-105> (дата звернення: 19.11.2025).
3. Nugraha I., Luthfiani F., Was Y. Improvement of engine room watchkeeping activity on Zada Hela Liveaboard. *Jurnal Ergonomi Indonesia*. 2023. Vol. 9. No. 1. P. 50–55. URL: <https://ojs.unud.ac.id/index.php/jei/article/view/90830/51035> (дата звернення: 19.11.2025).
4. Свиридов В., Андреев А., Андреев А. Аналіз впливу граничних рівнів вібрації на залишковий ресурс суднових машин і механізмів. *Розвиток транспорту*. 2023. № 4 (19). С. 125–139. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2023.4-19.10> (дата звернення: 19.11.2025).
5. Сорока В., Мельник О., Довгаль І. Математична модель оцінювання змащувальної здатності суднових дизельних палив. *Водний транспорт*. 2023. № 2 (36). С. 120–134. URL: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.3.6.10> (дата звернення: 19.11.2025).
6. Голубєва С., Гороховська О. Динамічна модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 2. № 49. С. 148–158. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.2.2024.321378> (дата звернення: 19.11.2025).
7. Сагін С., Заблоцький Ю., Сагін А. Підвищення економічності роботи суднових середньообертових дизелів. *Водний транспорт*. 2025. № 1 (42). С. 166–179. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20> (дата звернення: 19.11.2025).
8. Park M., Yeo S., Choi J., Lee W. Review of noise and vibration reduction technologies in marine machinery: Operational insights and engineering experience. *Applied Ocean Research*. 2024. Vol. 152. Article 104195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104195> (дата звернення: 19.11.2025).
9. 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. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12040593> (дата звернення: 19.11.2025).
10. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109838> (дата звернення: 19.11.2025).
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. DOI: <https://doi.org/10.1080/18366503.2022.2104494> (дата звернення: 19.11.2025).
12. 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. DOI: <https://doi.org/10.33714/masteb.1299692> (дата звернення: 19.11.2025).

13. 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. DOI: <https://doi.org/10.31217/p.37.1.4> (дата звернення: 19.11.2025).
14. 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. DOI: <https://doi.org/10.22306/al.v11i2.516> (дата звернення: 19.11.2025).
15. Shen W., Hu J., Liu L., Chen H. Operability analysis and line failure risk assessment for a tanker moored at berth. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 300. Article 117439. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117439> (дата звернення: 19.11.2025).
16. ICS maritime barometer report 2023–2024. London: ICS, 2024. 48 p. URL: <https://www.ics-shipping.org/wp-content/uploads/2024/09/ICS-Barometer-2023-2024-Full-report.pdf> (дата звернення: 19.11.2025).

References

1. Kononenko, A., & Slabko, V. (2024). Implementation of continuous education in forming professional competence of future marine engineers. *Scientific Journal. Series 5. Pedagogical Sciences: Realities and Prospects*, (101), 20–25. <https://doi.org/10.31392/UDU-nc.series5.2024.101.04> [in Ukrainian].
2. Stolyaryk, T. (2023). Ensuring lubrication regimes of marine four-stroke diesel engines. *Automation of Ship Technical Equipment*, (28), 90–105. <https://doi.org/10.31653/1819-3293-2023-1-28-90-105> [in Ukrainian].
3. Nugraha, I., Luthfiani, F., & Was, Y. (2023). Improvement of engine room watchkeeping activity on Zada Hela Liveaboard. *Jurnal Ergonomi Indonesia*, 9(1), 50–55. <https://ojs.unud.ac.id/index.php/jei/article/view/90830/51035> [in Ukrainian].
4. Svyrydov, V., Andreev, A., & Andriiev, A. (2023). Analysis of the impact of limit vibration levels on the residual life of ship machinery and mechanisms. *Transport Development*, 4(19), 125–139. <https://doi.org/10.33082/td.2023.4-19.10> [in Ukrainian].
5. Soroka, V., Melnyk, O., & Dovhal, I. (2023). Mathematical model for assessing the lubricating ability of marine distillate fuels. *Water Transport*, 2(36), 120–134. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.36.10> [in Ukrainian].
6. Holubeva, S., & Horokhovska, O. (2024). Dynamic model of a propulsion diesel-electric plant with unipolar machines. *Bulletin of the Pryazovskyi State Technical University. Series: Technical Sciences*, 2(49), 148–158. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.2.2024.321378> [in Ukrainian].
7. Sagin, S., Zablotskyi, Yu., & Sagin, A. (2025). Improving the efficiency of marine medium-speed diesel engines. *Water Transport*, 1(42), 166–179. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.20> [in Ukrainian].
8. 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. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104195>
9. 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. <https://doi.org/10.3390/jmse12040593>
10. 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 enhanced tribological performance of friction pairs in axial piston pumps: A review. *Tribology International*, 198, Article 109838. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109838>
11. Ceylan, B., Karatuğ, Ç., Ejder, E., Uyanık, T., & Arslanoğlu, Y. (2023). Risk assessment of sea chest fouling on ship machinery systems using both FMEA and ERS processes. *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*, 15(4), 414–433. <https://doi.org/10.1080/18366503.2022.2104494>
12. 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. <https://doi.org/10.33714/masteb.1299692>
13. Kocak, G., Gokcek, V., & Genc, Y. (2023). Condition monitoring and fault diagnosis of a marine diesel engine using machine learning techniques. *Pomorstvo*, 37(1), 32–46. <https://doi.org/10.31217/p.37.1.4>
14. Gharib, H., & Kovacs, G. (2024). Reliability analysis of marine diesel engines versus industrial diesel engines: A comparative approach. *Acta Logistica*, 11(2), 325–337. <https://doi.org/10.22306/al.v11i2.516>
15. 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. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117439>
16. International Chamber of Shipping. (2024). *ICS maritime barometer report 2023–2024*. <https://www.ics-shipping.org/wp-content/uploads/2024/09/ICS-Barometer-2023-2024-Full-report.pdf>

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 18.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

О. В. КЛЮЄВ

кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри електротехніки та електромеханіки
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0000-0003-4542-3317

О. О. ЯЩУК

здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти
Дніпровський державний технічний університет
ORCID: 0009-0007-3841-8997

УМОВИ САМОЗБУДЖЕННЯ КОНДЕНСАТОРНИХ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ

Для споживачів електроенергії невеликої потужності доцільніше використовувати асинхронні генератори (АГ) як джерела електроживлення, оскільки вони найбільш відповідають вимогам, що висуваються споживачами: висока якість вихідної напруги, мала маса, відносно низька ціна, висока надійність, простота конструкції та обслуговування. Асинхронний генератор з конденсаторним самозбудженням (АСГ) характеризується тим, що його обмотки не під'єднані до джерел живлення. Тому статичний режим роботи такого генератора описується системою однорідних алгебраїчних рівнянь в осях координат, орієнтованих за вектором потокозчеплення в повітряному зазорі асинхронної машини (АМ). Математичним виразом електромагнітних автоколиваний у статорі АСГ є наявність нетривіальних розв'язків системи однорідних рівнянь моделі статичного генератора, що можливе лише за умови рівності головного визначника системи рівнянь нулю. Розкриваючи цей визначник і прирівнюючи його до нуля з урахуванням залежності реактивних опорів схеми заміщення АСГ від частоти струму статора, отримуємо алгебраїчне рівняння відносно кругової частоти обертання поля генератора. Розв'язавши це рівняння, можна визначити залежність кругової частоти автоколиваний струму і напруги АСГ від величини ємності конденсаторів збудження. Визначник, який є комплексним числом, прирівнюється до нуля, і з умови рівності нулю його дійсної та уявної частин знаходиться математичний вираз умови від'ємності ковзання АСГ під час віддачі ним активної потужності у навантаження. Також, використовуючи описаний підхід, визначається частота електромагнітних коливаний у статорі АСГ відносно базової кругової частоти мережі. Із умови від'ємності ковзання визначається мінімальна ємність конденсаторів збудження на фазу, нижче якої автоколивальний режим не досягається, а корені характеристичного рівняння статорного кола є комплексно-спряженими, але зміщені в ліву півплощину комплексної площини коренів.

Ключові слова: асинхронна машина; асинхронний генератор із самозбудженням; конденсатори збудження; кругова частота поля; мінімальна ємність конденсатора.

O. V. KLIUIEV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics
Dniprovsky State Technical University
ORCID: 0000-0003-4542-3317

O. O. YASHCHUK

Postgraduate Student
Dniprovsky State Technical University, Kamianske
ORCID: 0009-0007-3841-8997

SELF-EXCITATION CONDITIONS OF CAPACITOR INDUCTION GENERATORS

For low-power electricity consumers, it is more practical to use asynchronous generators (AG) as power supply sources, since they best meet the requirements of users: high output voltage quality, low weight, relatively low cost, high reliability, and simplicity of design and maintenance. An asynchronous generator with capacitive self-excitation (SEIG) is characterized by the fact that its windings are not connected to external power sources. Therefore, the steady-state operation of such a generator is described by a system of homogeneous algebraic equations in coordinate axes

oriented along the flux linkage vector in the air gap of the asynchronous machine (AM). The mathematical expression of the electromagnetic self-oscillations in the stator of the SEIG is the existence of nontrivial solutions to the system of homogeneous equations of the generator's steady-state model, which is possible only when the main determinant of the system equals zero. By expanding this determinant and setting it to zero, taking into account the dependence of the reactive impedances of the SEIG equivalent circuit on the stator current frequency, an algebraic equation is obtained with respect to the angular frequency of the generator field rotation. By solving this equation, one can determine the relationship between the angular frequency of self-oscillations of current and voltage in the SEIG and the capacitance of the excitation capacitors. The determinant, being a complex number, is set to zero, and from the condition that both its real and imaginary parts equal zero, a mathematical expression is derived for the condition of negative slip of the SEIG during the delivery of active power to the load. Using the described approach, the frequency of electromagnetic oscillations in the SEIG stator is also determined relative to the base angular frequency of the power network. From the condition of negative slip, the minimum capacitance of excitation capacitors per phase is obtained—below this value, the self-oscillating mode cannot be achieved, and the roots of the stator circuit characteristic equation become complex conjugates shifted into the left half-plane of the complex root plane.

Key words: asynchronous machine, self-excited induction generator, excitation capacitors, angular field frequency, minimum capacitor capacitance.

Постановка проблеми

Для того щоб асинхронна машина могла працювати в генераторному режимі їй необхідно забезпечити збудження й обертання за рахунок витрати механічної енергії приводного двигуна. Робота АМ у генераторному режимі, у залежності від способу збудження може бути здійснена в двох варіантах: генератора з незалежним збудженням; самозбудного генератора.

При роботі АМ як генератора з незалежним збудженням, необхідний для неї струм, що намагнічує, надходить з мережі, у яку асинхронний генератор віддає свою активну потужність. Це можливо тільки при наявності мережі, на яку асинхронний генератор працює паралельно. Після того як забезпечене збудження машини, необхідно до вала її ротора прикласти зовнішній обертаючий момент із таким розрахунком, щоб кількість обертів ротора була більше синхронної і ковзання стало негативним. Тоді активні складові струмів ротора і статора змінять свій напрям на зворотній, у порівнянні з роботою в руховому режимі, і АМ почне віддавати в мережу активну потужність при постійній напрузі мережі. Виробничі значення роботи АМ у генераторному режимі з незалежним збудженням зв'язано з питаннями рекуперації енергії в мережу, від якої живиться АМ у руховому режимі.

Самозбудження АМ можливо здійснити від залишкового магнітного поля машини за допомогою ємності, включеної на затискачі статора АМ. Збудження АГ за рахунок ємності та залишкового магнетизму дає можливість використовувати повною мірою конструктивну простоту і надійність АМ, що знайшли своє найкраще вираження в короткозамкненому виконанні ротора, і одержати генератор гранично простий у конструктивному й експлуатаційному відношенні. Першим імпульсом для створення струму, що намагнічує, є ЕРС, що індукується в статорній обмотці АГ за рахунок залишкового потоку магнітопроводу електричної машини.

Асинхронні самозбуджувані генератори (АСГ) широко застосовуються як автономні джерела електричної енергії. Основні напрями їх використання охоплюють електростанції малої потужності, системи енергопостачання мобільних об'єктів, установки вітрової та малої гідроенергетики, а також автономні джерела живлення споживачів підвищеної частоти. Поширення АСГ пояснюється можливістю їх реалізації на основі стандартних серійних асинхронних машин із короткозамкненим ротором, що істотно знижує їх вартість. Асинхронний генератор з конденсаторним збудженням представляє резонансну систему, що генерує вільні електричні коливання, частота яких залежить від навантаження і може змінюватися відносно електричної частоти генератора на холостому ході на 10-15%, навіть за умови сталості частоти обертання ротора.

Створення високоякісних малогабаритних металоперевих і особливо плівкових конденсаторів, високий розвиток техніки регулювання на основі використання мікропроцесорних і оптронних елементів представляють широкі можливості для практичного використання простих, надійних і технологічних асинхронних машин при ємнісному самозбудженні. АСГ мають низку особливих властивостей, що відрізняють їх від інших типів машин, використовуваних у генераторному режимі: простота конструкції, висока надійність, міцність і стійкість до відцентрових навантажень, відсутність електричних контактів, найкращі питомі масогабаритні та вартісні показники, можливість одержання мінімальних співвідношень між радіальними й аксіальними габаритними розмірами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У статті [1] розглядається схема заміщення АСГ з активно-індуктивним навантаженням. Для стаціонарного режиму була розрахована потреба АСГ у реактивній потужності, визначене значення реактивного опору навантаження, при якій споживана генератором реактивна потужність стає мінімальною. Досліджувалися умови самозбудження генератора під навантаженням. Побудовано графіки залежності мінімальної ємності конденсаторів від швидкості ротора і величини повного опору навантаження. У статті [2] за допомогою методу власних чисел визначена мінімальна і максимальна ємність збудження, необхідні для автономного однофазного асинхронного

генератора, що використовує трифазну машину. Перевага запропонованого методу полягає в його простоті, оскільки вдається уникнути складної процедури розв'язання полінома високого порядку. Значення ємності, отримані запропонованим методом, були зрівняні зі значеннями, отриманими традиційним методом, і підтверджені експериментально для перевірки вірогідності і точності запропонованого підходу. У [3] для стабілізації вихідної напруги АСГ незалежно від навантаження або швидкості обертання вала первинного двигуна використовуються перемикачі у вигляді IGBT-транзисторів, що підключаються паралельно фіксованим конденсаторам збудження. Побудовано залежності ємності конденсаторів збудження від потужності навантаження при стабілізації напруги на затискачах статора генератора. У [4] розглядається визначення оптимальних значень конденсаторів, необхідних для одержання максимальної вихідної потужності однофазного самозбудного асинхронного генератора, створеного на основі трифазної машини, що працює на індуктивне і ємнісне навантаження. У статті представлені залежності максимальної вихідної потужності від коефіцієнта потужності індуктивного і ємнісного навантаження та швидкості обертання АСГ. У статті [5] представлена методика розрахунку ємності конденсаторів, необхідної для самозбудження асинхронного генератора, що заснована на визначенні коренів характеристичного рівняння статорного кола АМ.

Формулювання мети дослідження

У розглянутих літературних джерелах схема заміщення асинхронного генератора використовувалася як вихідна модель для того, щоб одержати, а потім досліджувати статичні характеристики АСГ, що характеризують його експлуатаційні або енергетичні показники. У даній статті ставиться задача на основі схеми заміщення АСГ як автономного чотириполюсника одержати за параметрами і змінними режиму умови самозбудження конденсаторних асинхронних генераторів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Рівняння АМ для генераторного режиму представлені в [6]. Для АМ з короткозамкненим ротором в ортогональних осях u, v , що обертаються з деякою швидкістю ω_k , рівняння генератора з підключеними до статора конденсаторами мають наступний вигляд:

$$-\bar{U}_s = R_s \bar{I}_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} + j\omega_k \bar{\Psi}_s, \quad 0 = R_r \bar{I}_r + \frac{d\bar{\Psi}_r}{dt} + j(\omega_k - \omega) \bar{\Psi}_r, \quad \bar{U}_s = \frac{1}{C} \int \bar{I}_s dt. \quad (1)$$

$$\bar{\Psi}_s = L_s \bar{I}_s + L_m \bar{I}_r, \quad \bar{\Psi}_r = L_m \bar{I}_s + L_r \bar{I}_r. \quad (2)$$

У статистиці трансформаторні ЕРС дорівнюють нулю, а $\omega_k = \omega_\square$, де $\omega_\square$ – кругова частота обертання поля в повітряному зазорі АМ. Рівняннями (1), (2) можна описати електромагнітні процеси в асинхронному генераторі з конденсаторним самозбудженням (АСГ). У статистиці рівняння рівноваги напруг (1) записуються так:

$$-\bar{U}_s = R_s \bar{I}_s + j\omega_c \bar{\Psi}_s, \quad 0 = R_r \bar{I}_r + j\omega_c s \bar{\Psi}_r, \quad \bar{U}_s = \frac{\bar{I}_s}{j\omega_c C}. \quad (3)$$

Після підстановки в (3) виразів потокозчеплень (2) і перетворень одержимо наступну систему рівнянь

$$\left(R_s + j\omega_c L_s - \frac{j}{\omega_c C} \right) \bar{I}_s + j\omega_c L_m \bar{I}_r = 0; \quad j\omega_c s L_m \bar{I}_s + (R_r + j\omega_c s L_r) \bar{I}_r = 0, \quad (4)$$

де $s = (\omega_c - \omega) / \omega_c$ – ковзання.

Перейдемо в системі рівнянь (4) від індуктивностей до реактивних опорів і будемо мати

$$\left[R_s + j(X_s - X_c) \right] \bar{I}_s + jX_m \bar{I}_r = 0; \quad jsX_m \bar{I}_s + (R_r + jsX_r) \bar{I}_r = 0, \quad (5)$$

де $X_m = \omega_c L_m$, $X_s = \omega_c L_s$, $X_r = \omega_c L_r$ – реактивні опори контуру намагнічування, статора і ротора відповідно; $X_c = \frac{1}{\omega_c C}$ – реактивний опір конденсаторів, підключених до статора генератора.

Система однорідних алгебраїчних рівнянь (4) має нетривіальне розв'язання ($\bar{I}_s = \bar{I}_r = 0$), якщо головний визначник цієї системи дорівнює нулю

$$\begin{vmatrix} R_s + j\left(\omega_c L_s - \frac{1}{\omega_c C}\right) & j\omega_c L_m \\ j\omega_c s L_m & R_r + j\omega_c s L_r \end{vmatrix} = 0. \quad (6)$$

З виразу (6) знайдемо умови самозбудження АСГ і частоту струму $\omega_\square$ в статорі генератора. У результаті розкриття визначника одержимо

$$R_s R_r \omega_c C - L_r s \omega_c (\omega_c^2 L_s C - 1) + \omega_c^3 L_m^2 C s + j [\omega_c^2 L_r R_s C s + R_r (\omega_c^2 L_s C - 1)] = 0. \quad (7)$$

Комплексне число дорівнює нулю, якщо дійсна і уявна частини одночасно дорівнюють нулю. З чого на основі (7) можна записати:

$$R_s R_r C - L_r s (\omega_c^2 L_s C - 1) + \omega_c^3 L_m^2 C s = 0; \quad \omega_c^2 L_r R_s C s + R_r (\omega_c^2 L_s C - 1) = 0. \quad (8)$$

З другого рівняння системи (8) виражаємо ковзання

$$s = \frac{R_r (1 - \omega_c^2 L_s C)}{\omega_c^2 L_r R_s C} \quad (9)$$

і підставляємо в перше рівняння системи (8), після перетворення якого приходимо до наступного біквадратного рівняння відносно кругової частоти струму статора генератора

$$L_s^2 C^2 (L_s L_r - L_m^2) \omega_c^4 - (2 L_s^2 L_r C - R_s^2 C^2 L_s L_r - L_m^2 L_s C) \omega_c^2 + L_s L_r = 0. \quad (10)$$

Фізично реалізованим значенням частоти є наступний корінь рівняння (10):

$$\omega_c = \sqrt{\frac{2 L_s L_r - R_s^2 C L_r - L_m^2 - \sqrt{L_m^4 + 2 R_s^2 L_m^2 C L_r + R_s^4 C^2 L_r^2 - 4 R_s^2 L_r^2 L_s C}}{2 L_s C (L_s L_r - L_m^2)}}. \quad (11)$$

З першого рівняння системи (5) виразимо струм ротора

$$\vec{I}_r = - \frac{[R_s + j(X_s - X_c)] \vec{I}_s}{j X_m}, \quad (12)$$

і підставимо його в друге рівняння системи (5). У підсумку одержимо вираз

$$-s X_m^2 - R_r R_s + X_r s (X_s - X_c) - j [R_r (X_s - X_c) + s X_r R_s] = 0, \quad (13)$$

за яким можна записати систему двох рівнянь

$$-s X_m^2 - R_r R_s + X_r s (X_s - X_c) = 0; \quad R_r (X_s - X_c) + s X_r R_s = 0. \quad (14)$$

З другого рівняння знаходимо різницю реактивних опорів

$$X_s - X_c = - \frac{s X_r R_s}{R_r}, \quad (15)$$

підставляємо її в перше рівняння (14) і після перетворень одержимо

$$R_r R_s + X_r^2 \frac{R_s}{R_r} s^2 = -s X_m^2. \quad (16)$$

З запису квадратного рівняння (16) відносно ковзання видно, що якщо це рівняння має дійсні корені, то вони можуть бути тільки негативними. Таким чином, вираз (16) указує на те, що конденсаторне самозбудження асинхронного генератора можливо тільки при негативних ковзаннях ($s < 0$), тобто коли кутова швидкість обертання ротора АМ перевищує кругову частоту обертання поля в повітряному зазорі ($\omega > \omega_{\square}$). Кутову швидкість обертання вала ω можна знайти після визначення з (11) кругової частоти обертання поля в повітряному зазорі АСГ $\omega_{\square}$ і ковзання s з рівняння (16).

Для аналізу властивостей АСГ, що працює на холостому ході при широкій зміні швидкості його обертання, необхідно врахувати зміну реактивних опорів машини, що має місце при цьому режимі роботи. Як відомо, реактивні опори машини залежать від частоти електричних коливань, що змінюється при зміні швидкості обертання ротора АСГ. При руховому режимі АМ її параметри співвідносяться з відомою частотою мережі, від якої вона живиться. У розглянутому випадку роботи АСГ частота виникаючих електричних коливань не відома і вимагає визначення. Крім того, частота буде змінюватися разом зі зміною швидкості обертання ротора АСГ. Тому зручніше віднести параметри АСГ до якої-небудь визначеної частоти, прийнятої за вихідну, а перерахування їх на дійсну частоту роботи введенням визначеного коефіцієнта. За вихідну прийmemo частоту мережі $f_0 = 50 \text{ Гц}$, на яку розрахована АМ при роботі двигуном і при якій легко визначаються її параметри експериментальним шляхом.

Введемо позначення: $f_0, \omega_0 = 2\pi f_0$ – частота і кругова частота мережі, прийнята за базову; $f_c, \omega_c = 2\pi f_c$ – частота і кругова частота струму статора АСГ; ω – кутова швидкість ротора. Коефіцієнт відносної частоти прийmemo наступним

$$F = f_c / f_0 = \omega_c / \omega_0. \quad (17)$$

Реактивні опори при зміні частоти струму будуть визначатися через паспортні параметри АМ за наступними формулами:

$$X_{\mu} = X_{\mu 0} F, \quad X_{s\sigma} = X_{s\sigma 0} F, \quad X_{r\sigma} = X_{r\sigma 0} F, \quad X_c = X_{c0} / F. \quad (18)$$

Рівняння сталого режиму АСГ складемо за його схемою заміщення, представленою на рисунку 1. Відповідно до законів Кірхгофа записана наступна система рівнянь:

$$\vec{I}_{\mu} = \vec{I}_s + \vec{I}_r; \left(R_s + jX_{s\sigma 0} F - j \frac{X_{c0}}{F} \right) \vec{I}_s + jX_{\mu 0} F \vec{I}_{\mu} = 0; \left(\frac{R_r}{s} + jX_{r\sigma 0} F \right) \vec{I}_r + jX_{\mu 0} F \vec{I}_{\mu} = 0. \quad (19)$$

Система рівнянь (19) перетворюється до наступної системи двох однорідних рівнянь відносно струмів статора і ротора

$$\left(R_s + jX_{s0} F - j \frac{X_{c0}}{F} \right) \vec{I}_s + jX_{\mu 0} F \vec{I}_r = 0; \quad jX_{\mu 0} s F \vec{I}_s + (R_r + jX_{r0} s F) \vec{I}_r = 0, \quad (20)$$

де $X_{s0} = X_{\mu 0} + X_{s\sigma 0}$, $X_{r0} = X_{\mu 0} + X_{r\sigma 0}$ – повні реактивні опори статора і ротора відповідно при базовій частоті.

Відносну частоту можна визначити з умов самозбудження, що запишуться в наступному вигляді

$$\begin{vmatrix} R_s + j(X_{s0} F - X_{c0}/F) & jX_{\mu 0} F \\ jX_{\mu 0} F s & R_r + jX_{r0} s F \end{vmatrix} = [R_s + j(X_{s0} F - X_{c0}/F)](R_r + jX_{r0} s F) + X_{\mu 0}^2 F^2 s = 0. \quad (21)$$

Рівність нулю комплексного числа (21) запишеться у вигляді системи двох рівнянь

$$R_s R_r - X_{r0} X_{s0} F^2 s + X_{r0} X_{c0} s + X_{\mu 0}^2 F^2 s = 0; \quad R_s X_{r0} F s + R_r X_{s0} F - R_r X_{c0} / F = 0. \quad (22)$$

З другого рівняння виражаємо ковзання

$$s = \frac{R_r (X_{c0} - X_{s0} F^2)}{R_s X_{r0} F^2} \quad (23)$$

і підставляємо його в перше рівняння системи (22). Після перетворень отримуємо наступне бікватратне рівняння для відносної частоти

$$X_{s0} (X_{s0} X_{r0} - X_{\mu 0}^2) F^4 - (2X_{r0} X_{s0} X_{c0} - R_s^2 X_{r0} - X_{\mu 0}^2 X_{c0}) F^2 + X_{r0} X_{c0}^2 = 0. \quad (24)$$

Дійсний корінь, що має фізичний сенс, дорівнює

$$F = \sqrt{\frac{2X_{r0} X_{s0} X_{c0} - R_s^2 X_{r0} - X_{\mu 0}^2 X_{c0} - \sqrt{X_{\mu 0}^4 X_{c0}^2 + 2R_s^2 X_{r0} X_{c0} X_{\mu 0}^2 + R_s^4 X_{r0}^2 - 4X_{r0}^2 R_s^2 X_{s0} X_{c0}}}{2X_{s0} (X_{s0} X_{r0} - X_{\mu 0}^2)}} \quad (25)$$

Якщо прийняти $R_s = 0$, оскільки активний опір статора для АМ середньої і великої потужності істотно менше повних реактивних опорів, то одержимо наближене значення відносної частоти

$$F = \sqrt{X_{c0} / X_{s0}}. \quad (26)$$

Якщо підставити (26) у (23), то одержимо нульове ковзання. При $R_s \neq 0$ відносна частота, визначена за (25), трохи більше величини (26) і ковзання (23) приймає негативні значення. Якщо в (11) покласти $R_s = 0$, то приходимо до значення $\omega_c = 1/\sqrt{CL_s}$, що виходить також з виразу (26), якщо в ньому реактивні опори записати через індуктивності і ємності.

У генераторному режимі ковзання негативне, що, як впливає з (23), досягається за умови

$$X_{c0} - X_{s0} F^2 < 0 \Rightarrow \frac{1}{\omega_0 C} < X_{s0} F^2 \Rightarrow C > C_{\min} = \frac{1}{X_{s0} F^2 \omega_0}. \quad (27)$$

Для реалізації процесу конденсаторного самозбудження асинхронного генератора ємності конденсаторів, що підключаються до статора, повинні бути більше розраховані за формулою (27). Таким чином, з умови можливості конденсаторного самозбудження ($s < 0$) визначається мінімальне значення ємності конденсаторів $C_{\min}$, нижче якого самозбудження не відбувається. Якщо $X_{c0} \rightarrow 0$ ($C \rightarrow \infty$), то $F \rightarrow 0$ ($\omega_c \rightarrow 0$), що впливає з формул (11) і (25). Тому для режиму холостого ходу АСГ відсутня верхня межа ємності конденсаторів збудження.

Для проведення розрахунків прийнята АМ типу 4А112М4УЗ з наступними паспортними даними: $P_n = 5.5 \text{ кВт}$, $n_c = 1500 \text{ об/хв}$, $U_{sl} = 380 \text{ В}$. Параметри схеми заміщення узяті з довідника для АМ серії 4А.

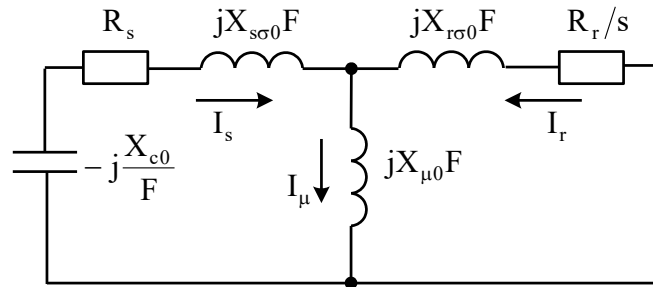


Рис. 1. Схема заміщення фази АСГ при холостому ході

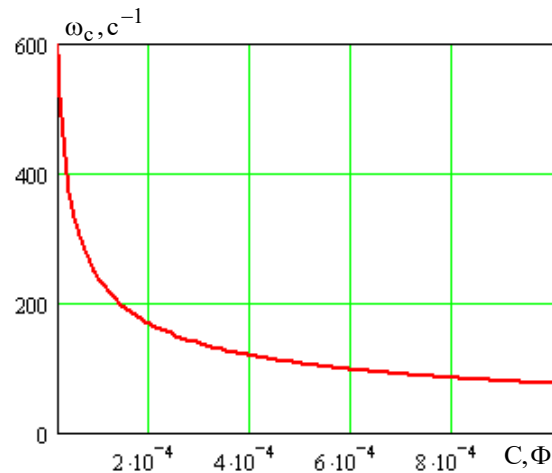


Рис. 2. Залежність кругової частоти струму статора АСГ від ємності конденсаторів збудження на фазу

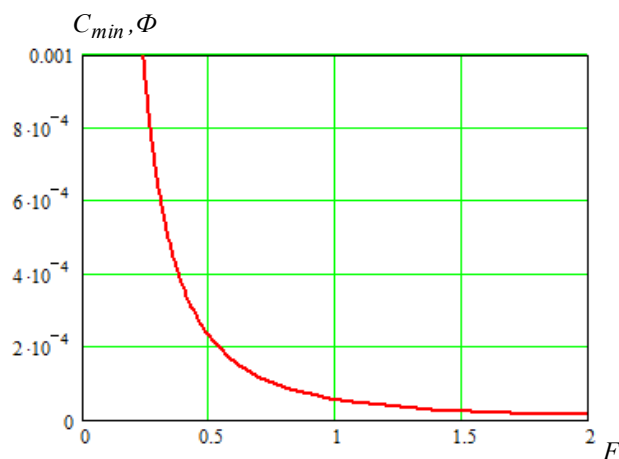


Рис. 3. Залежність мінімальної ємності конденсаторів на фазу від відносної частоти струму статора

За формулою (11) розраховувалися значення кругової частоти струму статора АСГ як функції ємності конденсаторів збудження в діапазоні $20 \div 1000 \text{ мкФ}$. Відлік ємності проводиться від її мінімально можливого значення. Як випливає з проведеного вище аналізу, вісь абсцис є горизонтальною асимптотою. Якщо за формулою (25) побудувати графік залежності відносної частоти струму статора від величини ємності конденсаторів, то цей графік буде цілком збігатися з кривою на рисунку 2 через масштабний множник кругової частоти мережі ω_0 . Обчислена за (25) відносна частота F підставлялася у формулу (27) і визначалися мінімальні значення ємності конденсаторів, нижче яких самозбудження неможливе. Результати цього розрахунку представлені у вигляді графіка на рисунку 3. З цього графіка випливає, що при швидкостях обертання ротора вище кругової частоти мережі

для самозбудження АСГ потрібна невелика ємність конденсаторів, не більш 50 мкФ при потужності АМ 5.5 кВт. При кутових швидкостях обертання ротора нижче половини кругової частоти мережі необхідна для самозбудження ємність починає швидко зростати і для швидкості $0.25\omega_0$ досягає 1000 мкФ.

Висновки

У статті від диференціальних рівнянь АСГ перейшли до його рівнянь статички, які записані через струми. З умови існування нетривіального розв'язання системи однорідних алгебраїчних рівнянь отримана формула, яка дозволяє знайти кругову частоту обертання поля в повітряному зазорі АСГ через його параметри. З цієї ж системи рівнянь знайдена величина ковзання, від'ємність якого є режимною умовою виникнення самозбудження. Складено схему заміщення АСГ для режиму холостого ходу, у якій реактansi є функціями частоти струму статора. Схема заміщення АСГ розглянута як автономний чотириполіусник, у якому можливі автоколивання при рівності його головного визначника нулю. Ця умова дозволила скласти алгебраїчне рівняння, у результаті розв'язання якого отримана формула для визначення відносної частоти струму статора генератора через реактansi схеми заміщення. Із забезпечення від'ємності ковзання отримана формула для розрахунку мінімально необхідної на фазу ємності конденсаторів, що служить умовою самозбудження АСГ за параметрами.

Список використаної літератури

1. Choudhary R., Saket R.K. A critical review on the self-excitation process and steady state analysis of an SEIG driven by wind turbine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Volume 47. P. 344–353. DOI: 10.11591/ijpeds.v11.i3.pp1211-1219
2. Mahato S.N., Singh S.P., Sharma M.P. Excitation capacitance required for self excited single phase induction generator using three phase machine. *Energy Conversion and Management*. 2008. Volume 49. P. 1126–1133. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.09.007>
3. Al-Saffar M.A., Eui-Cheol Nho, Lipo T.A. Controlled shunt capacitor self-excited induction generator. *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting*. 1998. P. 1486-1490. DOI: 10.1109/IAS.1998.730338
4. Mahato S. N., Singh S. P., Sharma M. P. Capacitors Required for Maximum Power of a Self-Excited Single-Phase Induction Generator Using a Three-Phase Machine. *IEEE transactions on energy conversion*. 2008. Volume 23. No.2, P. 372-381. DOI: 10.1109/TEC.2007.914394
5. Fadi Ouafia, Abbou Ahmed. Elaboration of the Minimum Capacitor for an Isolated Self Excited Induction Generator Driven by a Wind Turbine. *ICCSRE: International Conference of Computer Science and Renewable Energies*. 2018. P. 264-270, DOI: 10.5220/0009774302640270
6. Ключев О.В. Побудова і дослідження статичних характеристик асинхронізованого генератора. *The Norwegian Journal of development of the international science*. 2024. No.132. P. 123-128. DOI: 10.5281/zenodo.11200351

References

1. Choudhary, R., & Saket, R.K. (2015). A critical review on the self-excitation process and steady state analysis of an SEIG driven by wind turbine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 47. P. 344–353. DOI: 10.11591/ijpeds.v11.i3.pp1211-1219
2. Mahato, S.N., Singh, S.P., & Sharma, M.P. (2008). Excitation capacitance required for self excited single phase induction generator using three phase machine. *Energy Conversion and Management*. Volume 49. P. 1126–1133. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.09.007>
3. Al-Saffar, M.A., Eui-Cheol Nho, & Lipo, T.A. (1998). Controlled shunt capacitor self-excited induction generator. *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting*. P. 1486-1490. DOI: 10.1109/IAS.1998.730338
4. Mahato, S. N., Singh, S. P., & Sharma, M. P. (2008). Capacitors Required for Maximum Power of a Self-Excited Single-Phase Induction Generator Using a Three-Phase Machine. *IEEE transactions on energy conversion*. Volume 23. No.2, P. 372-381. DOI: 10.1109/TEC.2007.914394
5. Fadi Ouafia, & Abbou Ahmed. (2018). Elaboration of the Minimum Capacitor for an Isolated Self Excited Induction Generator Driven by a Wind Turbine. *ICCSRE: International Conference of Computer Science and Renewable Energies*. P. 264-270, DOI: 10.5220/0009774302640270
6. Kliuiev O.V. (2024). Pobudova i doslidzhennia statychnykh kharakterystyk asynkhronizovanoho heneratora. *The Norwegian Journal of development of the international science*. No.132. P. 123-128. DOI: 10.5281/zenodo.11200351 (in Ukrainian)

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.11.2025
 Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 14.12.2025
 Дата публікації: 31.12.2025

В. М. КОЛОДНЕНКОстарший викладач кафедри транспортних технологій
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-8450-6759**О. В. КЛЄЩ**здобувач вищої освіти
Сумський національний аграрний університет**Д. В. КЛИМЕНКО**здобувач вищої освіти
Сумський національний аграрний університет

КОМПЛЕКСНА КЛАСИФІКАЦІЯ ВАНТАЖІВ ЯК ОСНОВА ЕФЕКТИВНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Стаття присвячена комплексному дослідженню класифікації вантажів та впливу їхніх характеристик на організацію транспортних перевезень. Наголошується, що правильне визначення виду вантажу, його фізико-хімічних властивостей, габаритів, маси та регуляторного статусу є ключовим чинником ефективності логістичного процесу. Неправильно встановлені параметри вантажу призводять до порушення технології перевезення, збільшення витрат, появи аварійних ситуацій, погіршення якості продукції та виникнення спірних моментів між учасниками логістичного ланцюга. У роботі подано систематизований огляд основних груп вантажів за фізичним станом: твердими, рідкими, газоподібними та такими, що змінюють агрегатний стан. Розкрито їхні особливості транспортування, основні ризики та вимоги до пакування й технологічних процесів. Особлива увага приділена небезпечним вантажам та їх класифікації відповідно до ADR, що визначає специфічні заходи безпеки, порядок маркування, пакування, вибір транспортних засобів і вимоги до компетентності персоналу. Проаналізовано вплив регуляторних аспектів на процес організації перевезень та оцінку ризиків. Окремо розглянуто питання транспортування негабаритних і великовагових вантажів, що потребують спеціального технічного оснащення, інженерного супроводу та погоджень із державними структурами. Показано значення правильно підбраної тари та пакування, умов зберігання, термінів придатності й дотримання температурних режимів. Визначено вплив характеристик вантажу на вибір виду транспорту, маршрут перевезення, вимоги до кріплення, навантаження на осі та технічні показники перевізних засобів. Результати дослідження підтверджують, що комплексне врахування властивостей вантажу забезпечує безпеку руху, зниження логістичних витрат, підвищення ефективності та надійності перевезень, а також відповідність нормативно-правовим вимогам. Стаття формує науково-практичне підґрунтя для оптимізації логістичних рішень і вдосконалення транспортних технологій.

Ключові слова: логістика, вантажні перевезення, транспорт, вантаж, менеджмент, транспортна система.

V. M. KOLODNENKOSenior Lecturer at the Department of Transport Technologies
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-8450-6759**O. V. KLIESHCH**Student
Sumy National Agrarian University**D. V. KLYMENKO**Student
Sumy National Agrarian University

COMPREHENSIVE CLASSIFICATION OF CARGOES AS A BASIS FOR EFFECTIVE ORGANIZATION OF TRANSPORT OPERATIONS

The article is devoted to a comprehensive study of cargo classification and the influence of cargo characteristics on the organization of transport operations. It emphasizes that the accurate identification of the type of cargo, its physico-chemical properties, dimensions, weight, and regulatory status is a key factor in the efficiency of the logistics process. Incorrectly defined cargo parameters lead to violations of transportation technology, increased costs, the emergence of emergency situations, deterioration of product quality, and the occurrence of disputes between the participants of the logistics chain. The paper presents a systematized overview of the main cargo groups by their physical state: solid, liquid, gaseous, and those with variable aggregate conditions. Their transportation features, major risks, and requirements for packaging and technological processes are outlined. Special attention is paid to dangerous goods and their ADR classification, which defines specific safety measures, rules of marking, packaging, vehicle selection, and requirements for personnel competence. The influence of regulatory aspects on the organization of transportation and risk assessment is analyzed. The article separately examines the transportation of oversized and heavy cargoes, which require specialized technical equipment, engineering support, and approvals from state authorities. The significance of properly selected packaging, storage conditions, shelf life, and adherence to temperature regimes is highlighted. The study identifies how cargo characteristics affect the selection of transport modes, routing, securing requirements, axle load, and technical indicators of the transport means. The results confirm that a comprehensive consideration of cargo properties ensures traffic safety, reduction of logistics costs, increased efficiency and reliability of transportation, and compliance with legal regulations. The article forms a scientific and practical basis for optimizing logistics decisions and improving transport technologies.

Key words: logistics, freight transportation, transport, cargo, management, transport system.

Постановка проблеми

Ефективність організації вантажних перевезень напряму залежить від правильного визначення виду та характеристик вантажу. Неправильне визначення характеристик вантажу призводить до порушень технології транспортування, збільшення витрат, підвищує ризики пошкодження вантажу та виникнення спірних ситуацій між учасниками логістичного процесу. Проблема ускладнюється різноманітністю вантажів, відсутністю уніфікованого підходу до їх опису та необхідністю враховувати їх специфіку у кожному окремому випадку. Тому виникає потреба в систематизованому аналізі видів вантажів, їхніх ключових характеристик та створенні єдиних критеріїв класифікації, що дозволить оптимізувати логістичні операції та підвищити ефективність транспортних перевезень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика класифікації вантажів та визначення їхніх властивостей висвітлюється у працях багатьох дослідників у сфері логістики та транспортних технологій. У науковій літературі різні автори зосереджують увагу на систематизації вантажів за фізичними, хімічними, габаритними та експлуатаційними характеристиками, а також на вимогах до їхнього пакування, маркування та умов перевезення. Окремі публікації присвячені питанням стандартизації та нормативного регулювання, тоді як інші аналізують практичні аспекти організації транспортування та вплив специфічних властивостей вантажу на вибір транспортних засобів і прийняття певних логістичних рішень. Незважаючи на різноманітність підходів, у багатьох дослідженнях підкреслюється необхідність комплексного розуміння характеристик вантажу як основи для безпечного та ефективного процесу перевезення.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є систематизація видів вантажів та їхніх ключових характеристик, узагальнення підходів до їх класифікації та встановлення впливу властивостей вантажу на процес транспортування, вибір транспортних засобів, логістичні рішення та вимоги до безпеки перевезень.

Викладення основного матеріалу дослідження

Дослідження характеристик вантажів починається із ознайомлення з класифікацією вантажів за фізичним станом. Враховуючи різноманітність вантажів та особливостей їх транспортування пропонуємо ознайомитися із таблицею 1.

Фізичний стан вантажу визначає всі подальші рішення, які приймаються для успішного здійснення перевезення: починаючи від вибору транспортного засобу до особливостей пакування, кріплення, а також документального оформлення. Тверді вантажі мають різні підвиди, кожен з яких формує власні технологічні вимоги до тари, маркування та розміщення вантажу в кузові автомобіля. Насипні матеріали, наприклад зерно або щебінь, потребують ретельного розподілу ваги вздовж всієї довжини причепа/напівпричепа з метою безпеки транспортування та захисту від вологості, адже зміщення розподілу маси або намокання вантажу (і відповідно збільшення його ваги) може спричинити аварійні ситуації, а також часткову або повну втрату товару. Такі вантажі, як борошно чи цемент вимагають герметичного пакування. Тарно-штучні вантажі (металопрокат, металеві та дерев'яні конструкції, ящики, біг-беги тощо) потребують надійного кріплення, особливо при перевезеннях на великі відстані та у складних дорожніх умовах, адже мають ризик зсуву, чим можуть нанести фізичні пошкодження кузову автомобіля[10].

Негабаритні вантажі вимагають дотримання безпеки руху та максимальної обережності при транспортуванні. А небезпечні вантажі правильного поводження та дотримання всіх правил перевезення для конкретного виду небезпечного вантажу[2,4].

Таблиця 1

Фізичний стан вантажів (власна розробка)

Категорія	Підвиди	Особливості транспортування	Додаткові вимоги та ризики	Приклади
Тверді вантажі	– Сипучі – Тарно-штучні – Негабаритні – Небезпечні	Контроль вологості, правильне кріплення, уникнення механічних пошкоджень	Контроль за деформацією вантажу та тари, виділення великої кількості пилу	Зерно, добрива, паливні гранули, поліетилен, металопрокат, мінеральна вода, борошно, обладнання тощо
Рідкі вантажі	– Харчові рідини – Технічні рідини	Перевезення в цистернах, герметичність, контроль температури	У харчових рідин контроль за дотриманням фітосанітарних норм. У технічних рідин наявність сертифікатів ДОПНВ (ADR)	Молоко, соки, нафта, дизельне паливо, керосин
Газоподібні вантажі	– Стиснені гази – Зріджені гази	Спеціалізовані балони або цистерни, контроль тиску	Вибухонебезпечність, хімічне отруєння, небезпека від перепаду температур	Пропан-бутан, кисень, азот, аміак
Вантажі зі змінним агрегатним станом	– Охолоджені товари – Заморожені товари	Контроль вологості та температури	Ризик псування всієї продукції у випадку недотримання температурного режиму	М'ясо, риба, ліки, сири, молочна продукція

Рідкі вантажі, поділяються на харчові та технічні рідини, і вимагають дотримання абсолютно різних вимог до транспортування. Харчові рідини транспортуються у цистернах, які відповідають фітосанітарним вимогам, із контролем температури, обов'язковою дезінфекцією та ізоляцією від навколишнього середовища, адже будь-яке відхилення від норм та правил перевезення впливає на споживчу якість. Технічні рідини (паливо, нафта, керосин) транспортуються в герметичних цистернах із системами запобігання випаровування, контролем заземлення при заправці, а також обов'язковим контролем температурного режиму для стабільності хімічного складу. Незважаючи на те, що обидві групи – це рідини, їхні технологічні та нормативні вимоги відрізняються, що робить перевезення харчових та технічних рідин двома абсолютно різними типами перевезення.

Газоподібні вантажі – окрема категорія вантажів через високий ступінь вибухонебезпечності та токсичності. Перевезення потребує спеціальних цистерн, балонів та безпечних маршрутів. Водії повинні мати спеціальну кваліфікацію, а транспортні засоби – системи моніторингу тиску.

Вантажі зі змінним агрегатним станом (охолоджені та заморожені продукти) – найбільш чутливі до відхилень температури та вологості. Їхня якість залежить від безперервного підтримання необхідної температури, швидкості доставки, ізоляції від сторонніх джерел тепла чи холоду. Порушення температурного режиму призводить до псування товару та значних фінансових втрат.

Безвідповідальне ставлення до фізичного стану вантажу створює великі ризики виникнення різноманітних інцидентів в процесі перевезення, від втрати товару до юридичної відповідальності за порушення норм перевезення.

Після визначення фізичного стану вантажу переходимо до оцінки його небезпечних властивостей. Не всі тверді, рідкі або газоподібні вантажі є небезпечними, але поєднання фізичних характеристик із потенційними ризиками створює необхідність у застосуванні спеціальних заходів безпеки при перевезенні окремих видів вантажів. Наприклад, рідке паливо – це одночасно, і рідина, і легкозаймистий вантаж, що вимагає одночасного контролю температури, герметичності та дотримання протипожежних норм. Таким чином, класифікація за фізичним станом стає основою для подальшої оцінки ступеня небезпеки та планування маршруту доставки. Тому подальше дослідження теми вантажів слід продовжувати, ознайомившись із малюнком 1 «Категорії небезпечних вантажів» [2] та таблицею 2 «Небезпечні вантажі (ADR)».

Небезпечні вантажі являють собою окрему спеціалізацію логістичних процесів, де будь-яка помилка може мати критичні наслідки для життя людей, рухомого та нерухомого майна, а також для навколишнього середовища. Класифікація небезпечних вантажів (ADR) встановлює стандарти безпеки: маркування, пакування, перевезення, навчання персоналу тощо. Кожен клас має специфічні ризики, і порушення правил транспортування часто призводить до адміністративної та кримінальної відповідальності.

Вибухові речовини (клас 1) потребують суворого контролю маси, вибору маршруту з найменшою кількістю трафіку та населених пунктів, а також ізоляції від зовнішнього впливу, адже будь-який неправильний рух або удар може спричинити вибух.

 • ВИБУХІВКА • БОЄПРИПАСИ • ПАТРОНИ • ПОРОХ • РАКЕТИ • ПІРОТЕХНІКА	 • КАЛІЙ • НАТРІЙ • СІРКА • АЛЮМІНІЙ • ВУГІЛЛЯ • ПАПІР	 • УРАН • ІТРІЙ • СТРОНЦІЙ • ІРМІДІЙ • КОБАЛЬТ
 • КИСЕНЬ • ПРОПАН • АЗОН • ПОВІТРЯ • АМІАК • ХЛОР	 • ПЕРОКСИДА • НІТРАТИ • АМОНІЙ • ХЛОРИТИ	 • КИСЛОТА • ЛУЖ • РТУТЬ • ФАРБА
 • БЕНЗИН • НАФТА • ОЛІЙ • МЕТАНОЛ • ГАС • СПИРТ	 • ПЕСТИЦИДИ • ІНФЕКЦІЙНІ РЕЧОВИНИ • ЛІКИ • ШАНЦІД • МИШ'ЯК	 • ЛІТІЙОВІ БАТАРЕЇ • ПИЛ • АВІГУНИ • АСТБЕСТ • АКБ

Рис. 1. Категорії небезпечних вантажів [2]

Газоподібні вантажі (клас 2) потребують контролю тиску та герметичності, а також захисту від перегріву та низьких температур. Ризики включають вибух, удушення та отруєння, що потребує обмеження маршрутів руху та високі вимоги щодо кваліфікації водіїв.

Легкозаймисті рідини та тверді речовини (класи 3 і 4) формують більшість вантажопотоку небезпечних вантажів. Ключові параметри – це температура спалаху, пакування, відсутність вологості та наявність вентиляції. Будь-яке відхилення може призвести до самозаймання або займання вантажу.

Окисники та пероксида (клас 5) вимагають ізоляції від органічних матеріалів і суворого температурного контролю, оскільки вони здатні вступати в реакцію навіть при мінімальному контакті з неорганічними речовинами.

Токсичні та корозійні речовини (класи 6 і 8) потребують повної герметизації та спеціального екіпірування персоналу. Будь-який контакт з повітрям або вологою може призвести до викидів або руйнування тари, що створює ризики для життя і навколишнього середовища.

Радіоактивні вантажі (клас 7) перевозяться у багаторівневих контейнерах з екрануванням та суворим контролем дози опромінення. Маршрути обирають через малозаселені ділянки, персонал проходить спеціальне навчання, а також знаходиться під постійним дозиметричним контролем.

Інші небезпечні вантажі (клас 9), зокрема літій-іонні батареї, вимагають постійного контролю температури, вентиляції та ізоляції від джерел тепла. Їхня нестабільність при перегріванні робить вкрай обережне поводження з вантажем обов'язковою вимогою до водія та персоналу на всіх етапах перевезення.

Після ідентифікації небезпечних властивостей вантажу настає етап визначення регуляторних вимог. Кожен клас безпеки підпорядковується суворим міжнародним і національним правилам та законам, а порушення цих норм може призвести до штрафів, затримок або аварій. Регуляторна класифікація складається з митного статусу вантажу, потреби у ветеринарному чи фітосанітарному контролі, а також наявності або відсутності страхування вантажу [11]. Це все стосується документально-правової частини будь-якого перевезення. Правильне оформлення всіх необхідних документів створює усі умови для уникнення затримок чи непорозумінь на кордоні, адже тоді вантаж має юридичну захищеність зі всіх сторін.

Митний контроль визначає, які документи потрібні при перетині кордону, чи застосовується ПДВ, акцизи або мита. Неправильне оформлення декларацій може призвести до затримки вантажу, штрафів або конфіскації.

Ветеринарний контроль поширюється на продукти тваринного походження: м'ясо, молочні вироби, яйця. Вантаж повинен мати сертифікати походження, бути упакованим у герметичну тару та зберігатися в допустимих температурних умовах. Недотримання норм може призвести до повернення вантажу або до його знищення.

Таблиця 2

Небезпечні вантажі (ADR)

Клас	Назва	Приклади	Основні ризики	Особливості транспортування
1	Вибухові речовини і вироби	Піротехніка, детонатори, боєприпаси	Вибух, ударна хвиля	Обмеження маси; ізоляція; спеціальні маршрути
2	Гази	Пропан-бутан, хлор, аміак	Вибух, токсичність, тиск	Цистерни високого тиску; контроль витoku
3	Легкозаймисті рідини	Бензин, розчинники, лакофарбові компоненти	Займання, вибух	Герметичність; заземлення при наливi
4.1	Легкозаймисті тверді речовини, самореактивні речовини, полімерізуючі речовини і тверді десенсибілізовані вибухові речовини	Сірка, магній, фосфор	Самозаймання	Контроль вологості; захист від іскр
4.2	Речовини, здатні до самозаймання			
4.3	Речовини, що виділяють займисті гази при контакті з водою			
5.1	Окислюючі речовини	Нітрати, пероксид водню	Реактивність	Ізоляція від органіки; температурний контроль
5.2	Органічні пероксиди			
6.1	Токсичні речовини	Пестициди, ціаніди	Отруєння	Герметизація; захист екіпажу
6.2	Інфекційні речовини			
7	Радіоактивні матеріали	Ізотопи, радіоактивні джерела, ядерне паливо	Радіоактивне опромінення	Спеціальне маркування
8	Корозійні речовини	Кислоти, луги	Хімічні опіки	Хімістійкі ємності; ізоляція
9	Інші небезпечні речовини і вироби	Літій-іонні батареї, акумулятори	Перегрів, займання	Контроль температури; вентиляція

Таблиця 3

Вимоги державних регуляторів до перевезення окремих вантажів

Категорія	Підвиди / Статуси	Пояснення / Особливості
Митний контроль	Потребує / Не потребує	залежить від режиму переміщення товару через кордон; оформлення декларацій, податків
Ветеринарний контроль	Підлягає / Не підлягає	продукти тваринного походження; контроль якості та санітарних вимог; сертифікація продукції
Фітосанітарний контроль	Підлягає / Не підлягає	рослинна продукція, деревина, насіння; термообробка тари, перевірка на наявність шкідників
Страховий статус	Застрахований / Незастрахований	визначає фінансову відповідальність при пошкодженні вантажу; Застосовується CMR-страхування при міжнародних автомобільних перевезеннях дорого-вартісних вантажів, Carnet TIR – транзит без перевірок на кордоні
Ліцензійні/акцизні вимоги	Потребує / Не потребує	окремі категорії вантажів (алкоголь, тютюн, ліки)

Фітосанітарний контроль застосовується до рослинної продукції, деревини, насіння, що забезпечує захист від шкідників і хвороб. Навіть піддони з необробленої деревини можуть підлягати карантину. Вантажі перевіряються на наявність шкідливих комах, спор грибків і бактерій, що впливає на терміни доставки та підготовку до перевезення.

Страховий статус регулює фінансову відповідальність сторін. Незастрахований вантаж повністю лягає на експедитора або перевізника у випадку втрати або пошкодження. Застрахований вантаж за системою CMR-страхування покриває збитки у міжнародних автомобільних перевезеннях, а TIR-Carnet дозволяє здійснювати транзит через кілька країн з мінімальними перевітками, зменшуючи затримки[11].

Ліцензійні вимоги та вимоги на наявність акцизів часто накладають додаткові обмеження на маршрути та транспортні засоби. Наприклад, алкоголь або фармацевтика потребують спеціальних дозволів і додаткової товаро-супровідної документації[3-4].

Тобто, регуляторні характеристики визначають обсяг підготовчої роботи, кількість необхідної документації для швидкого здійснення перевезення, а також ризики фінансових втрат.

Після врахування регуляторних вимог важливо звернути увагу на фізичні габарити та масу вантажів. Великогабаритні, великовагові та довгомірні вантажі створюють додаткові технічні виклики, що включають

необхідність спеціалізованого транспорту, професійного інженерного супроводу та ретельного планування маршруту з урахуванням обмежень на мости, тунелі та дороги[1,6].

Негабаритні вантажі є однією з найскладніших категорій вантажів у транспортній логістиці, оскільки поєднують перевищення нормативних розмірів, маси або довжини і часто не піддаються розбиранню на дрібніші частини. Це робить їх несумісними зі стандартними транспортними засобами. Основним завданням є комплексне планування: інженерний аналіз маршруту (мости, тунелі, обмежувальні рамки, повороти), оцінка міцності дорожнього полотна, розрахунок навантаження на осі, визначення оптимального положення центру ваги та підбір спеціалізованого транспортного обладнання[2,3,5]. Нестандартні габарити призводять до нерівномірного навантаження на транспорт, що вимагає точних розрахунків кріплення та використання багатоосьових модульних платформ. Будь-яка помилка у визначенні ваги, довжини або радіусу повороту може спричинити зміщення вантажу, його перекидання або пошкодження інфраструктури.

Такі перевезення потребують значного адміністративного супроводу: спеціальні дозволи від дорожніх служб, погодження графіку руху, іноді – тимчасове перекриття доріг і супровід поліції. Через розміри вантажу рух може блокувати частину транспортного потоку, тому перевезення часто проводяться у нічний час або під час мінімальної інтенсивності руху. Крім того, негабаритні вантажі потребують підвищених заходів безпеки: обов'язкового страхування[11], залучення охорони, оцінки ризиків пошкодження інфраструктури та супроводу інженерною групою на критичних ділянках маршруту[8-9].

Після оцінки розмірів і маси вантажу наступним критично важливим етапом є визначення способу пакування та вибору тари. Правильне пакування забезпечує не лише безпеку вантажу, але й ефективне використання простору транспортного засобу. Тара та упаковка враховують усі попередні характеристики вантажу – фізичний стан, рівень небезпеки, регуляторні вимоги та габарити – і забезпечують захист від пошкоджень, псування та мінімізують ризик аварійних ситуацій під час перевезення.

Наступним важливим аспектом є умови зберігання та термін придатності вантажу. Навіть правильно запакований вантаж може втратити якість або стати небезпечним, якщо не дотримуватися температурного режиму, вологості чи термінів придатності. Контроль цих параметрів є невід'ємною частиною безпечної та ефективного перевезення.

Вибір транспортного засобу, як ми з'ясували, визначається характеристиками вантажу. Кожен тип транспорту має обмеження щодо вантажопідйомності, габаритів, температурного режиму та швидкості доставки. Планування маршруту та підбір транспорту повинні враховувати всі попередні параметри вантажу. Лише комплексний підхід забезпечує безпечне, економічно обґрунтоване та ефективне перевезення[6-7].

Фізико-хімічні властивості вантажу визначають первинні вимоги до тари: висока маса потребує підвищеної міцності та здатності витримувати навантаження, нестандартні габарити – відповідну геометрію, а агрегатний стан – герметизацію, вентиляцію та амортизацію вантажу. Хімічно активні або чутливі до вібрацій вантажі потребують спеціальних матеріалів та демпфувальних систем.

Після врахування всіх характеристик вантажу та пакування визначаються вимоги до транспорту. Вантажі з великою масою потребують надійного кріплення, великі чи нестандартні – стійкості при маневруванні, а чутливі – контролю температури, вологості та вентиляції. Небезпечні вантажі додають вимог до конструкції транспорту, систем безпеки та підготовки персоналу. Тобто транспорт обирається так, щоб безпечно та ефективно перевезти вантаж, дотримуючись усіх технічних і нормативних правил.

Висновки

Отже, підсумовуючи усе вищесказане, можна впевнено сказати, що ефективне планування та організація перевезень безпосередньо залежать від комплексного розуміння властивостей вантажу як основного об'єкта транспортної логістики. Знання про фізичний стан, небезпечність, агрегатний стан, габарити, масу, умови зберігання та терміни придатності вантажу, визначають всі подальші логістичні процеси. Класифікація вантажів дозволяє чітко встановити технічні, пакувальні, регуляторні та безпекові вимоги до перевезення. Це знання дає змогу планувати оптимальні маршрути, приймати зважені логістичні рішення, мінімізувати ризики втрат і пошкоджень вантажу, а також забезпечувати безпеку руху та дотримання законодавчих норм.

Список використаної літератури

1. Мікуліна М., Клещ О., Данило В., Паливода Є. Менеджмент у транспортній галузі. Sectoral Research XXI: Characteristics and Features : матеріали VI Міжнар. наук.-теорет. конф. (Чикаго, 8 вересня 2023 р.). Чикаго, 2023. С. 107–109.
2. Мікуліна М. О., Клещ О. В. Перевезення небезпечних вантажів в умовах бойових дій. Modern Research in World Science : матеріали 12-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (Львів, 26–28 лютого 2023 р.). Львів, 2023. С. 302–307.
3. Колодненко В. М., Клещ О. В., Клименко Д. В. Роль транспортної географії при плануванні маршрутів доставки. Current Issues of Science, Prospects and Challenges : матеріали VI Міжнар. наук.-теорет. конф. (Сідней, 17 травня 2024 р.). Sydney, 2024. С. 103–105. Режим доступу: <https://previous.scientia.report/index.php/archive/issue/view/17.05.2024>

4. Постанова Кабінету Міністрів України № 137 від 02.03.2010 «Про затвердження Порядку перевезення небезпечних вантажів».
5. Kilpatrick J. Heavy-Duty Transport and Oversized Cargo Logistics. London: Routledge, 2020. 312 p.
6. Semenov I., Kaup M. Risk management of oversize cargo transport. WUT Journal of Transportation Engineering, 2020, vol. 129, pp. 63–71. DOI: 10.5604/01.3001.0014.3142.
7. Hellström D., Saghir M. Packaging logistics in supply chain practice – current state, challenges and opportunities. International Journal of Logistics Systems and Management, 2007, Vol. 3(2), pp. 172–186.
8. Болквадзе Н., Мигаль О. Вантажні перевезення автомобільним транспортом в міжнародному бізнесі. Економіка та суспільство. 2022. № 46. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-46-20>
9. Бойченко М. В. Проблеми транспортної логістики вантажних перевезень в Україні. Вісник економічної науки України. 2018. № 2 (35).
10. Рудєва А. С., Симонян Л. В. Класифікація тарно-штучних вантажів. Комунальне господарство міст. № 103. С. 473–475.
11. Шемонаєв В. Правове значення загальної аварії при страхуванні вантажу. Цивільне право і процес. 2019. № 30.

References

1. Mikulina, M., Kleshch, O., Danylo, V., & Palyvoda, Ye. (2023). Menedzhment u transportnii haluzi. In Sectoral Research XXI: Characteristics and Features (Proceedings of the VI International Scientific and Theoretical Conference, Chicago, September 8, 2023) (pp. 107–109). Chicago.
2. Mikulina, M. O., & Kleshch, O. V. (2023). Perevezennia nebezpechnykh vantazhiv v umovakh boiovykh dii. In Modern Research in World Science (Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference, Lviv, February 26–28, 2023) (pp. 302–307). Lviv.
3. Kolodnenko, V. M., Kleshch, O. V., & Klymenko, D. V. (2024). Rol transportnoi heohrafii pry planuvanni marshrutiv dostavky. In Current Issues of Science, Prospects and Challenges (Proceedings of the VI International Scientific and Theoretical Conference, Sydney, May 17, 2024) (pp. 103–105). Sydney. Retrieved from <https://previous.scientia.report/index.php/archive/issue/view/17.05.2024>.
4. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2010). Resolution No. 137 of March 2, 2010, On Approval of the Procedure for the Carriage of Dangerous Goods. Kyiv.
5. Kilpatrick, J. (2020). Heavy-duty transport and oversized cargo logistics. Routledge.
6. Semenov, I., & Kaup, M. (2020). Risk management of oversize cargo transport. WUT Journal of Transportation Engineering, 129, 63–71. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.3142>.
7. Hellström, D., & Saghir, M. (2007). Packaging logistics in supply chain practice – current state, challenges and opportunities. International Journal of Logistics Systems and Management, 3(2), 172–186.
8. Bolkvadze, N., & Myhal, O. (2022). Vantazhni perevezennia avtomobilnym transportom v mizhnarodnomu biznesi. Economics and Society, 46. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-46-20>.
9. Boichenko, M. V. (2018). Problemy transportnoi lohistyky vantazhnykh perevezen v Ukraini. Visnyk Ekonomichnoi Nauky Ukrainy, 2(35).
10. Rudieva, A. S., & Symonian, L. V. (n.d.). Klyasyfikatsiia tarno-shtuchnykh vantazhiv. Komunalne Hospodarstvo Mist, (103), 473–475.
11. Shemonaiev, V. (2019). Pravove znachennia zahalnoi avarii pry strakhuvanni vantazhu. Cyvilne Pravo i Protses, 30.

Дата першого надходження рукопису до видання: 10.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 05.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

С. О. КОПИЛОВ

аспірант кафедри технології пластичних мас
і біологічно активних полімерівНаціональний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ORCID: 0000-0003-1984-4468

ОДЕРЖАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕРЕВИНО-ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ З ОДНОЧАСНОЮ МОДИФІКАЦІЄЮ ПОЛІМЕРНОЇ МАТРИЦІ ТА ДЕРЕВИННОГО НАПОВНЮВАЧА

В даній статті розроблені нові склади ДПК і досліджені їх технологічні та експлуатаційні властивості, особлива увага приділялась ДПК з високою водостійкістю та грибостійкістю. Запропоновано використання відходів, які важко переробляються, таких як пінополістирол та термопластичний поліуретан для модифікації деревинного наповнювача та полімерної матриці. Це рішення додатково сприяє вирішенню екологічної проблеми та покращує експлуатаційні та фізико-хімічні властивості виробів з ДПК. Для визначення вмісту вологи як в готовому виробі так і на проміжній стадії виробництва використовували методи визначення діелектричної проникності, тангенса кута діелектричних втрат та електричного опору. Визначення цих показників дало можливість вчасно з'ясувати наявність вологи в полімерній матриці та деревинному наповнювачі за для корегування процесу виробництва ДПК. Використовували метод одночасної модифікації як полімерної матриці так і деревинного наповнювача, що дає синергійний ефект і є перспективним та ефективним для попередження водопоглинання, для підвищення фізико-механічних властивостей та подовження строку експлуатації виробів з ДПК. Ефективність методу одночасної модифікації ДПК з синергетичним ефектом підтверджується випробуваннями лише на рівні діелектричних характеристик отриманих зразків, що видно з результатів дослідження. З результатів досліджень впливу модифікації ДПК на рівень стійкості до зовнішніх умов і рівень тангенса кута діелектричних втрат $\tan \delta$ доведено, що ефективно зв'язування вільної води в ДПК дозволяє підвищити комплекс діелектричних характеристик. Процес модифікації полімерної матриці та деревинного наповнювача був проаналізовано за допомогою інфрачервоної спектроскопії. Це дало можливість зробити висновок, що найбільше значний ефект модифікації наповнювача пов'язаний зі зменшенням кількості вільних гідроксильних груп після просочування модифікуючою сумішшю.

Ключові слова: композит, наповнювач, зв'язує, властивості, фізико-механічні характеристики, діелектричні характеристики, водопоглинання, грибостійкість.

S. O. KOPYLOV

Postgraduate Student at the Department of Plastics
and Biologically Active Polymers Technology

National Technical University Kharkiv Polytechnic Institute

ORCID: 0000-0003-1984-4468

PREPARATION AND RESEARCH OF WOOD-POLYMER COMPOSITES WITH SIMULTANEOUS MODIFICATION OF THE POLYMER MATRIX AND WOOD FILLER

In this article, new WPC compositions were developed and their technological and operational properties were investigated, with special attention paid to WPC with high water resistance and fungus resistance. The use of waste that is difficult to recycle, such as expanded polystyrene and thermoplastic polyurethane, for the modification of the wood filler and polymer matrix was proposed. This solution additionally contributes to solving the environmental problem and improves the operational and physicochemical properties of WPC products. To determine the moisture content both in the finished product and at the intermediate stage of production, methods for determining the dielectric permittivity, dielectric loss tangent and electrical resistance were used. The determination of these indicators made it possible to timely determine the presence of moisture in the polymer matrix and wood filler in order to adjust the WPC production process. The method of simultaneous modification of both the polymer matrix and the wood filler was used, which gives a synergistic effect and is promising and effective for preventing water absorption, for improving the physical and mechanical properties and extending the service life of WPC products. The effectiveness of the method of simultaneous modification of WPC with a synergistic effect is confirmed by tests only at the level of dielectric characteristics of the obtained samples, which is evident from the results of the study. From the results of studies of the influence of WPC

modification on the level of resistance to external conditions and the level of the dielectric loss tangent $\tan \delta$, it is proven that effective binding of free water in WPC allows to increase the complex of dielectric characteristics. The process of modification of the polymer matrix and wood filler was analyzed using infrared spectroscopy. This made it possible to conclude that the most significant effect of filler modification is associated with a decrease in the number of free hydroxyl groups after impregnation with the modifying mixture.

Key words: composite, filler, binder, properties, physical and mechanical characteristics, dielectric characteristics, water absorption, fungal resistance.

Постановка проблеми

В умовах важкого стану України виникла не тільки проблема погіршення екологічної обстановки, а й дефіциту сировинних ресурсів. Тому постає питання про використання промислових та побутових відходів для виготовлення композитних матеріалів. На підставі ринкового аналізу та потреб виробництва у сировині, значно збільшується роль вторинних сировинних ресурсів [1]. У випадку виробництва ДПК це використання вторинних поліолефінів – поліетилену та поліпропілену. Вони не мають обмежень за санітарно-технічними нормами в будівельній індустрії, мають комплекс цінних властивостей: хімічну стійкість, значну теплостійкість, морозостійкість, міцність, високі діелектричні характеристики.

Однак, особливості структури, які зумовлюють ці властивості, є одночасно причиною, що ускладнює використання цього матеріалу. Так, неполярність поліолефінів з одного боку, надає їм гарну хімічну стійкість і діелектричні властивості, а з іншого – призводить до обмеження адгезії до різних наповнювачів у зв'язку з чим одержувані композити характеризуються невисокими показниками водостійкості та міцності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наукові досягнення, світовий досвід та ринковий попит свідчать про актуальне впровадження використання вторинної сировини у виробництво, що вирішує екологічні та економічні проблеми [2-6]. Найбільш поширене використання полімерних композиційних матеріалів застосовують у будівельній галузі в якості теплоізоляційних, конструкційних, оздоблювальних та декоративних виробів. Одним з різновидів композиційних матеріалів є деревино-полімерний композит (ДПК) на основі термопластів [7]. Основними найпоширенішими представниками термопластів є поліетилен (ПЕ) та поліпропілен (ПП) [1]. Обсяг їх виробництва сягає більше 35 % загальносвітового ринку полімерів. Вибір цих поліолефінів пояснюється простотою їх переробки та модифікації [1]. В Україні ринок полімерних матеріалів (сировини) залежить від імпорту. Станом на 2022 рік в Україні працювало 418 імпортерів та 225 вітчизняних виробників виробів з полімерних матеріалів [1]. Через військову агресію росії та тяжкий стан країни багато підприємств полімерної галузі призупинили свою діяльність або були знищені. Через загальне падіння ринку будівництва та ремонту, яке спостерігалось у 2022-2023 роки, знизився попит і на полімерні матеріали для будівництва (Рис. 1).

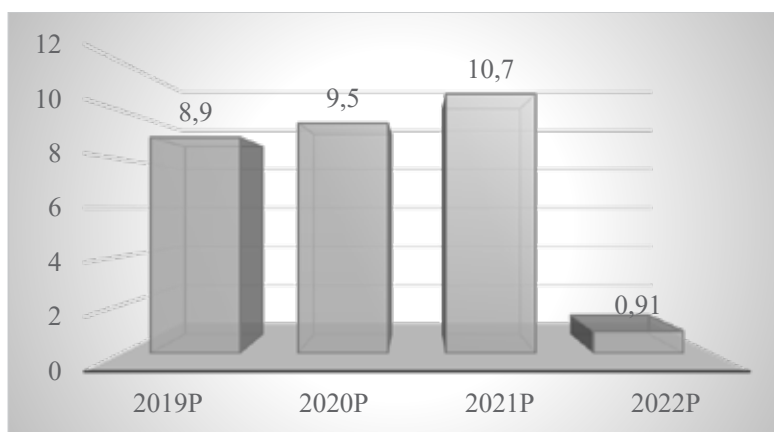


Рис. 1. Загальний імпорт виробів з полімерних матеріалів 2019-2022 рр., тис. тон

Починаючи з 2023 року має місце позитивна тенденція зростання внутрішнього виробництва, але значну долю потреби у виробі з полімерних матеріалів задовольняються за рахунок імпортової продукції. Саме тому є актуальним розробка новітніх ДПК на основі вторинних поліолефінів з підвищеним комплексом технологічних та експлуатаційних властивостей.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження статті є одержання та дослідження ДПК з одночасною модифікацією полімерної матриці та деревинного наповнювача.

Приготування розроблених ДПК починали з творення однорідного розчину нафто-полімерної смоли в розчиннику, далі додавали відходи пінополістиролу, який розчиняється в розчині з отриманням модифікуючої суміші. В отриману модифікуючу суміш додавали деревинний наповнювач для просочування до повної гомогенізації суміш, а далі до просоченого гомогенізованого деревинного наповнювача додавали мікрокальцит. Гомогенізовану модифікуючу суміш висушували в лабораторній суширці протягом 1 години за температури 70 °C, або лишали на 12 годин при кімнатній температурі на повітрі. Під час стадії просочування рідкою сумішшю деревинного наповнювача та сушки випаровувалося 12-15 % зайвого розчинника. Висушений наповнювач змішували з вторинною полімерною сировиною (поліетилен (ПЕ) та поліетилен і термопластичний поліуретан (ПЕ+ТПУ)) та виготовляли ДПК екструзійним методом.

Визначення густини зразків проводилося відповідно до ASTM-D-792. Визначення ударної в'язкості (ISO 180:2000), руйнівної напруги при згині (ISO 178:2010), твердості за Брінелем (ISO 2039-2) та міцності при ударі (ISO 6272-1:2002) зразків проводилось відповідно до міжнародних стандартів. Водопоглинання визначали відповідно до ASTM-D-570, зносостійкість та усадку визначали відповідно до DIN 53 516, визначення зміни лінійних розмірів при нагріванні відповідно ISO 11501:1995. Діелектричну проникність визначали за DIN 53458, Тангенс кута діелектричних втрат визначали за DIN 53458-1965-03. Електричний спротив визначали за ISO 3915:2022, Утримання статичного заряду визначали за ДСТУ 12.1018-86.

Розвиток грибної колонії досліджували контамінацією зразків музейною культурою дріжджоподібних грибів *Candida albicans* у концентрації 10^5 КУО/см³ і приготування культури заданої концентрації шляхом розведення музейної культури стерильною дистильованою водою до отримання заданої концентрації. Далі наносили підготовлені культури на попередньо оброблені ватним тампоном, змоченим 70% спиртом, поверхні зразка № 1 та зразка № 2, при чому площа поверхонь, що підлягає контамінації, становить по 50 см² для кожного зразка. Далі виконували контроль наявності заданої концентрації культури дріжджоподібних грибів *Candida albicans* на контамінованих поверхнях зразка № 1 та зразка № 2 методом змивів згідно ДСТУ ISO 18593:2006. Для цього стерильний тампон зволожується у стерильному фізіологічному розчині. Площі зразків № 1 та № 2, з яких беруть змиви, становлять по 25 см² для кожного зразка. Кінчик палички з тампоном асептично відламується або зрізається у пробірку з фізіологічним розчином (5 см³), яка струшується у шейкері протягом 30 секунд. Отримана первинна суспензія інокулюється у дві чашки Петрі (з метою проведення паралельного дослідження) із поживним середовищем агар Сабуро по 1 см³ інокуляту, із розподіленням його по всій поверхні агару кожної з чашок стерильним шпателем. Чашки з агаром розміщуються горизонтально, доки поверхня не висохне, після чого відбувається інкубація їх в термостаті при температурі 20–22 °C з експозицією 5 діб. Після інкубаційного періоду підраховується кількість колоній, що утворилися в результаті висіву змивів із кожного зразка (зразок № 1 та зразок № 2). Наступним етапом є обчислення кількості одиниць, що утворюють колонії (КУО) на 1 см² досліджуваної поверхні N_s .

За результатами підрахунку при проведенні контрольного дослідження щодо контамінації поверхонь зразків № 1 та № 2 культурою дріжджоподібних грибів *Candida albicans* підтверджено, що зразки було контаміновано збудником у концентрації 10^5 КУО/см³.

Далі проводили виявлення наявності або відсутності збільшення концентрації *Candida albicans* на поверхні зразків у сприятливих для зросту даного збудника умовах. Створення та підтримання протягом 5 діб (час експозиції) умов, сприятливих для утворення нових колоній (зросту) дріжджоподібних грибів *Candida albicans* шляхом підтримання постійної температури на рівні 22 °C та підвищеного рівня вологості середовища ($\geq 78\%$) у термостаті, в якому розміщуються зразки № 1 та № 2, контаміновані культурою дріжджоподібних грибів *Candida albicans* у концентрації 10^5 КУО/см³ для інкубації. По закінченню терміну інкубації зразки № 1 та № 2 піддаються подальшому дослідженню з використанням методу змивів (мазків), після чого проводиться підрахунок колоній, що вирости, та розрахунок концентрації збудника на поверхні кожного із зразків (№ 1 та № 2).

Викладення основного матеріалу дослідження

Були розроблені нові склади ДПК і досліджені їх технологічні та експлуатаційні властивості, особлива увага приділялась ДПК з високою водостійкістю та грибостійкістю. Склад розроблених ДПК, виготовлених по методу одночасної модифікації полімерної матриці і наповнювача, наведено в табл. 1.

Запропоновано використання відходів, які важко переробляються, таких як пінополістирол та термопластичний поліуретан для модифікації деревинного наповнювача та полімерної матриці. Це рішення додатково сприяє вирішенню екологічної проблеми та покращує експлуатаційні та фізико-хімічні властивості виробів з ДПК. Термопластичний поліуретан використовували для зменшення пористості структури полімерної матриці, а відходи пінополістиролу для покращення ізоляційних властивостей.

В табл. 2 наведено порівняльні значення фізико-механічних властивостей виготовлених зразків ДПК на основі модифікованого наповнювача та торгівельних зразків ДПК.

В таблицях 3 і 4 наведено характеристика електричного спротиву на зовнішньої та внутрішньої поверхнях зразків виготовленого ДПК з модифікованим наповнювачем та одночасною модифікацією наповнювача та матриці.

Таблиця 1

Склад композицій ДПК з модифікованими полімерними матрицями та наповнювачем

Композиція	Вторинний РЕ, (%)	Вторинний ТПУ, (%)	Нафтополімерна смола, (г)	Розчинник бензин Б-70, (г)	Відходи пінополістиролу, (г)	Відходи меблевого виробництва, (г)	Мікро-кальцит, (г)
1	97	3	5	15	5	25	3
2	95	5	5	15	5	25	3
3	93	7	5	15	5	25	3
4	90	10	5	15	5	25	3
5	85	15	5	15	5	25	3
6	80	20	5	15	5	25	3

Таблиця 2

Порівняльні значення фізико-механічних властивостей зразків ДПК на основі модифікованого наповнювача та торгівельних зразків ДПК

Композит	A кДж/см²	σ , МПа	Водопоглинання, %	Зносостійкість, м	Зміна лінійних розмірів, % +15° C + 80° C	Зміна лінійних розмірів, % -15° C
1	9,27	14,38	+6,5	0,108	Не виявлено	Не виявлено
2	8,09	14,60	+6,2	0,142	Не виявлено	Не виявлено
3	6,98	15,88	+5,4	0,113	Не виявлено	Не виявлено
4	9,52	17,23	+5,3	0,101	Не виявлено	Не виявлено
5	9,13	15,07	+5,3	0,102	Не виявлено	Не виявлено
6	6,02	15,85	+6,3	0,103	Не виявлено	Не виявлено
7	6,35	10,9	+6,1	0,052	Не виявлено	Не виявлено
8	3,44	10,85	+5,9	0,072	Не виявлено	Не виявлено
9	4,96	11,53	+6,2	0,075	Не виявлено	Не виявлено
Торгівельний зразок ДПК	2,74	18,2	+10,8	0,296	довжина +1,98 товщина +6,78	довжина -0,97 товщина -2,77 ширина -1,22
Зразок OSB	11,03	9,04	+44,18	0,337	довжина +3,86 товщина +10,3 ширина +4,18	довжина -1,58 товщина -8,62 ширина -2,94
Зразок ДСП ламінований	11,52	14,7	+42,15	0,33	довжина +2,28 товщина +7,7 ширина +6,29	довжина -1,6 товщина -5,13 ширина -2,37

Таблиця 3

Характеристика електричного спротиву на зовнішньої та внутрішньої поверхнях різних зразків ДПК з модифікованим наповнювачем

Зразок ДПК	Середні значення	
	Зовнішня поверхня	Внутрішня поверхня
1	97,5	180,7
2	105,95	179,86
3	106,35	185,4
4	108,65	187,91
5	109,1	>200
6	102,5	>200
7	105,95	>200
8	101,3	>200
9	100,95	>200
10	99,53	191.195
11	100,35	165.05
12	102,65	171.1
13	102,4	163.75
Вторинне виготовлення	105,005	181.1
Торгівельний зразок	103,11	154.45

Для виробів з деревино-полімерного композиту важливим фактором якості є незмінність геометричних форм виробу та стабільність фізико-механічних властивостей під час експлуатації під впливом навколишнього середовища [8]. Всі ці характеристики та властивості безпосередньо пов'язані з властивостями матеріалів, які входять до складу композиту. Тому методи прогнозування експлуатаційних показників на підставі вивчення та вимірювання властивостей матеріалів та параметрів їх підготовки при вводі у процес виробництва дуже важливі [9]. Для отримання порівняльних даних одночасно проводили випробовування деревино-полімерного композиту розробленого та промислового зразка. Виходячи з вимог для виробів з ДПК в якості експлуатаційних характеристик досліджували міцнісні властивості, при зберіганні в атмосферних умовах, діелектричні властивості та характер змін після впливу експлуатаційних факторів. Волога в матеріалі може бути придбаною в процесі експлуатації та залишковою, яка лишається в сировині при порушенні умов зберігання або помилкою в процесі виробництва [10]. Для визначення вмісту вологи як в готовому виробі так і на проміжній стадії виробництва використовують методи визначення діелектричної проникності, тангенса кута діелектричних втрат та електричного спротиву. Визначення цих показників дає можливість вчасно з'ясувати наявність вологи в полімерній матриці та деревинному наповнювачі за для корегування процесу виробництва ДПК.

Таблиця 4

Характеристика електричного спротиву на зовнішньої та внутрішньої поверхнях зразків ДПК виготовленими за методом одночасної модифікації наповнювача та матриці

Зразок ДПК	Середнє значення	
	Зовнішня поверхня	Внутрішня поверхня
1	140,8	>200
2	149,75	>200
3	152,4	>200
4	164,65	>200
5	176,1	>200
6	182,2	>200

З порівняльного аналізу таблиць 3 та 4 видно, що зразки виготовлені за методом одночасної модифікації більш захищені від впливу вологи, яка лишається на зовнішній поверхні виробу, а деревинний наповнювач захищений від потрапляння вологи ззовні.

В таблицях 5 і 6 наведено характеристика діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат різних зразків ДПК з модифікованим наповнювачем та з одночасною модифікацією наповнювача та матриці.

Таблиця 5

Характеристика діелектричної проникності та тангенса кута діелектричних втрат зразків ДПК з модифікованим наповнювачем

Композиція	Температура, °C	Середнє значення $\tan \delta$	Середнє значення $C, \text{пФ}$
1	23	0,0373	1,53
2	23	0,0435	1,63
3	23	0,0193	1,63
4	23	0,0172	1,63
5	23	0,0237	1,63
6	23	0,0195	1,50
7	23	0,0213	1,50
8	23	0,0233	1,56
9	23	0,0196	1,50
10	23	0,0254	1,43
11	23	0,0118	1,46
12	23	0,0191	1,50
13	23	0,0179	1,53
повторний прогон	23	0,0227	1,53
промисловий зразок	23	0,0486	1,56

Примітка: $\tan \delta$ - тангенс кута діелектричної втрати; $C, \text{пФ}$ - діелектрична проникність.

З аналізу таблиць 5 та 6 видно, що тангенс кута діелектричних втрат в зразках виготовлених за методом одночасної модифікації менше на 32% порівняно зі зразками, в яких модифікований тільки деревинний наповнювач, що додатково свідчить про ефективність цього методу виробництва. Крім того, водопоглинання та десорбція

виробів з ДПК, яка відбувається в процесі використання готового виробу супроводжується зміною лінійних розмірів та ваги. Матеріал стискається або набухає коли деревинний наповнювач підсушується або поглинає вологу. Відсутність стабільності розмірів є ще одним з недоліків цих матеріалів. В результаті багаторазового набухання та усихання часточок деревинного наповнювача порушується адгезія з полімерною матрицею і як наслідок має місце поява мікротріщин у виробі. У зв'язку з цим до складу ДПК вводять різноманітні доданки. В готовому виробі з ДПК пориста структура полімерної матриці має здатність набувати вологу і відповідно передавати її в деревинний наповнювач. Тому модифікація полімерної матриці має значення як для попередження водопоглинання так і для підвищення фізико- механічних властивостей.

Таблиця 6

Характеристика діелектричної проникності та тангенсу кута діелектричних втрат зразків ДПК виготовленими за методом одночасної модифікації наповнювача та матриці

Композиція	Температура, °C	Середнє значення tg δ	Середнє значення C, пФ
1	23	0,0015	1,33
2	23	0,0012	1,3
3	23	0,001	1,26
4	23	0,0008	1,21
5	23	0,0006	1,19
6	23	0,0005	1,16

В таблиці 7 наведено основні показники розроблених ДПК виготовлених методом одночасної модифікації та промислових зразків ДПК.

Таблиця 7

Порівняльна характеристика основних показників розроблених ДПК виготовлених методом одночасної модифікації та промислових зразків ДПК

Композит	Водопоглинення, W, %	Зносостійкість, м	a, кДж/см²	σ, МПа	Зміна розмірів в інтервалі +30 °C; +80 °C	Міцність при ударі
№ 1 новий	+2,64	0,082	9,03	9,44	не виявлено	h=25 в м'ятина h=30 роздавлений
№ 2 новий	+2,51	0,078	9,32	9,73	не виявлено	h=30 в м'ятина h=35 роздавлений
№ 3 новий	+2,38	0,054	9,68	10,2	не виявлено	h=30 в м'ятина h=35 роздавлений
№ 4 новий	+2,2	0,0312	10,06	12,37	не виявлено	h=30 в м'ятина h=35 роздавлений
№ 6 запропонован раніше	+6,2	0,142	8,09	14,6	не виявлено	h=15 в м'ятина h=20 розлом
№ 7 запропонован раніше	+5,4	0,113	6,98	15,88	не виявлено	h=15 в м'ятина h=20 розлом
№ 8 запропонован раніше	+5,3	0,101	9,52	17,23	не виявлено	h=15 в м'ятина h=20 розлом
№ 9 запропонован раніше	+5,3	0,102	9,13	15,06	не виявлено	h=15 в м'ятина h=20 розлом
Торгівельний зразок ДПК	+10,8	0,309	2,74	18,2	довжина +1,98 товщина +6,78	h=10 в м'ятина h=15 розлом
Зразок OSB	+44,18	0,326	11,03	9,04	довжина +3,86 товщина +10,3 ширина +4,18	h=10 розлом
Зразок ДСП ламінований	+42,15	0,312	11,52	14,7	довжина +2,28 товщина +7,7 ширина +6,29	h=10 розлом

Наявність вологи залишкової чи придбаної в процесі експлуатації дає можливість розвитку мікробів та різних грибів як на зовнішніх сторонах виробу так і з середини. Саме розвиток мікробів та грибних культур з середини є основною причиною руйнації виробів. Зростання мікробів та грибної колонії в середині матеріалу неможливо зупинити повністю, а відповідно і руйнацію матеріалу.

Використання методу одночасної модифікації як полімерної матриці так і деревинного наповнювача, дає синергійний ефект і є перспективним та ефективним для попередження водопоглинання та подовження строку експлуатації виробів з ДПК [8]. Вироби з деревино-полімерного композиту під час експлуатації схильні до

термічного впливу в присутності кисню [9]. За цих умов проходить реакція не термічного характеру, а термічного окислення. Ці процеси можуть проходити не тільки при підвищених температурах, а й при кімнатних. При цьому швидкість реакції знижується.

Процес модифікації полімерної матриці та деревинного наповнювача був проаналізовано за допомогою інфрачервоної спектроскопії. Результати досліджень інфрачервоної спектроскопії наведені на рис. 1-4.

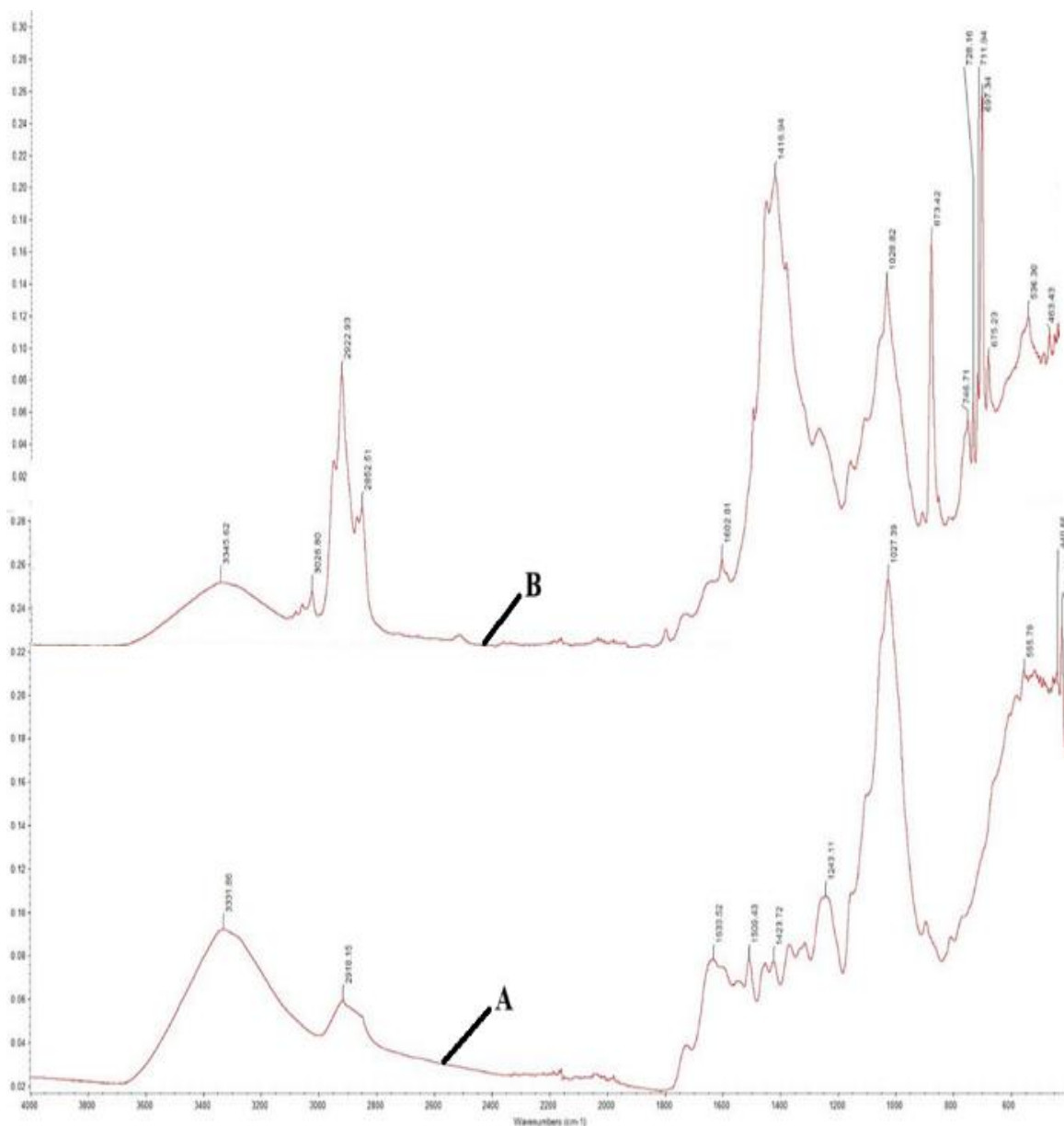


Рис. 2. ІЧ спектри немодифікованого (А) та немодифікованого (В) деревинного наповнювача

З рисунків 2-3 ІЧ-спектроскопії можна зробити висновок, що найбільше значний ефект модифікації наповнювача пов'язаний із зменшенням кількості вільних гідроксильних груп, що чітко видно при зміні в області довжин хвиль 3000-3700 см⁻¹: велика смуга з максимумом при 3331 см⁻¹ для немодифікованого наповнювача стає набагато менш інтенсивним і менше за площею в максимумі за 3341 см⁻¹ при модифікації. При порівнянні ІЧ-спектрів вихідної полімерної матриці та модифікованих ДПК можна побачити ту саму тенденцію [10].

Ефективність методу одночасної модифікації підтверджують випробування на розвиток грибних колоній в матеріалі, порівняльні характеристики зразків на грибостійкість наведені в табл. 8.

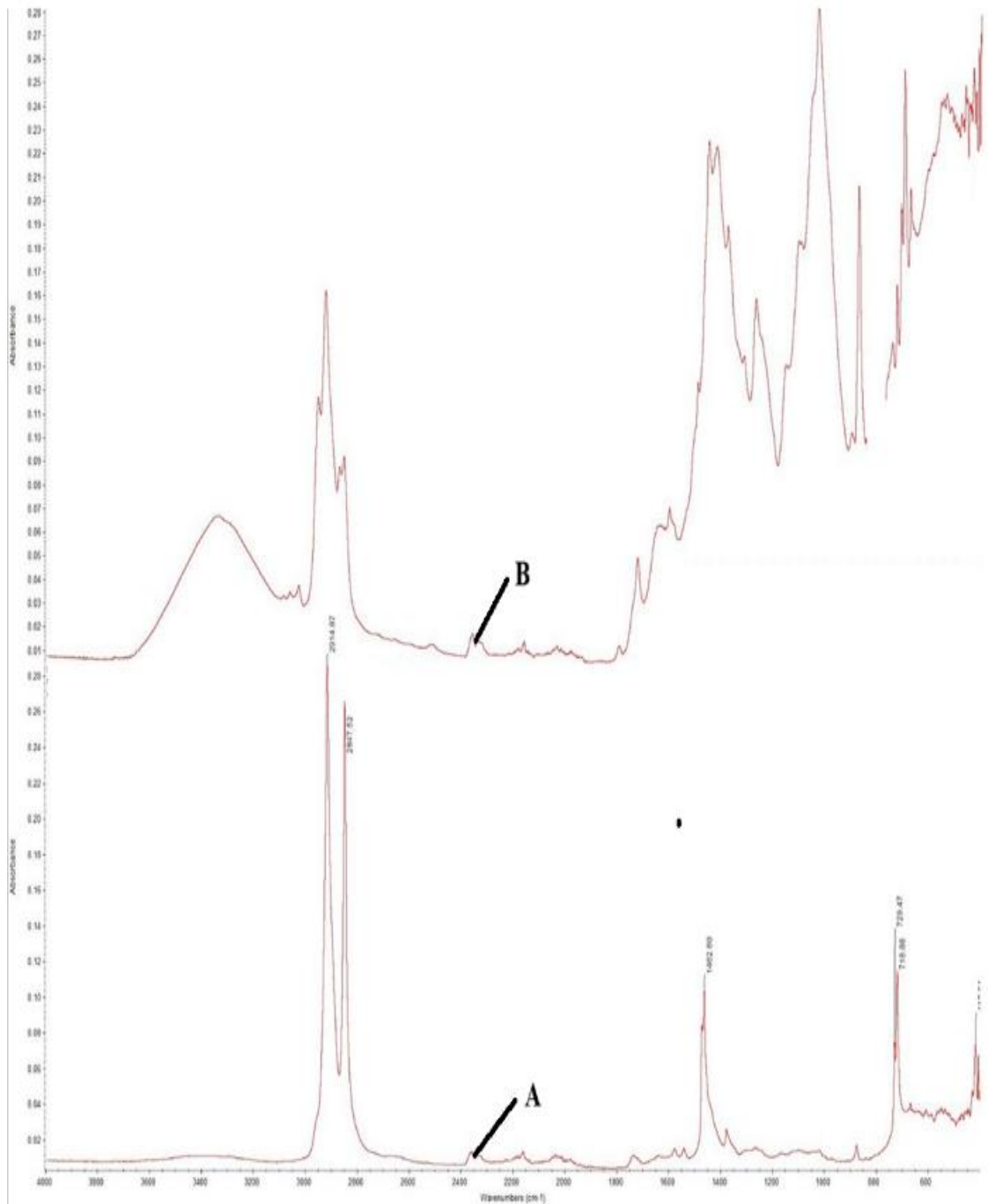


Рис. 3. ІЧ спектри модифікованої полімерної матриці (А) та зразка виготовленого по методу одночасної модифікації матриці і наповнювача (В)

Ефективність методу одночасної модифікації ДПК з синергетичної ефектом підтверджується випробуваннями лише на рівні діелектричних характеристик отриманих зразків, що видно з результатів дослідження. З результатів досліджень впливу модифікації ДПК на рівень стійкості до зовнішніх умов і рівень тангенсу кута діелектричних втрат $\tan \delta$ виразно видно, що ефективне зв'язування вільної води в ДПК дозволяє підвищити комплекс діелектричних характеристик.

Таблиця 8

Порівняльна характеристика зразків розроблених ДПК з одночасною модифікацією та інших зразків ДПК на грибостійкість згідно ДСТУ EN 14126:2008

Зразок	Зразок контамінований дріжджоподібними грибами <i>Candida albicans</i> у концентрації 10^5 КУО/см ³	Зразок контамінований дріжджоподібними грибами <i>Candida albicans</i> . після зберігання зразка протягом 5 діб у сприятливих для зросту збудника умовах
Запропонований зразок № 4 з одночасною модифікацією	<i>Candida albicans</i> 10^5	<i>Candida albicans</i> 10^5
Запропонований зразок № 8 з модифікованим деревинним наповнювачем	<i>Candida albicans</i> 10^5	<i>Candida albicans</i> 10^6
Промисловий зразок ДПК	<i>Candida albicans</i> 10^5	<i>Candida albicans</i> 10^7
Зразок ДСП	<i>Candida albicans</i> 10^5	<i>Candida albicans</i> 10^9
Зразок OSB	<i>Candida albicans</i> 10^5	<i>Candida albicans</i> 10^9

Висновки

Таким чином, аналіз накопиченого до цього часу наукового та виробничого досвіду та проблем при виготовленні, а також при використанні виробів з ДПК, свідчить про ефективність та переваги запропонованого складу ДПК і використання методу одночасної модифікації полімерної матриці та наповнювача, що дає синергійний ефект. В даній статті наведені огляд дослідження та розробки процесів одержання ДПК, з одночасною модифікацією полімерної матриці та деревинного наповнювача. Вивчені проблеми водопоглинання виробів з ДПК та методи їх визначення за допомогою діелектричних властивостей матеріалу. Визначено оптимальний склад модифікованої полімерної матриці ДПК та склад модифікованого деревинного наповнювача. Визначені параметри отримання виробів методом екструзії. Визначені причини розвитку грибних колоній, подальших руйнувань виробів з ДПК та методи запобігання негативного впливу. Досягнута мета утилізації відходів, які важко переробляються, методом рециклінгу в корисні для суспільства вироби.

Список використаної літератури

1. Corrêa H.L. The War in Ukraine and Its Impact on Polymer Production and Supply in Russian Federation: First Impressions // J Mod Polym Chem Mater. 2022. No 1(2). P. 4. DOI: 10.53964/jmpcm.2022007.
2. Danchenko Y, Andronov V, Kariev A, Lebedev V., Rybka E., Meleshchenko R., Yavorska D. Research into surface properties of disperse fillers based on plant raw materials // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. № 5(12(89)). P. 20-26. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.111350
3. Danchenko Y., Kariev A., Andronov V., Cherkashina A., Lebedev V., Shkolnikova T., Burlutskyi O., Kosse A., Lutsenko Y., Yavors'ka D. A research of chemical nature and surface properties of plant disperse fillers. Eastern-European // Journal of Enterprise Technologies. 2020. № 1(6(103)). P. 32-41. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.193383
4. Danchenko Y, Kariev A, Lebedev V., Barabash E., Obizhenko T. Physic-Mechanical properties of composites based on secondary polypropylene and dispersed of plant waste // Materials Science Forum. 2020. № 1006. P. 227-232. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.227
5. Lebedev V., Tykhomyrova T., Miroshnichenko D., Filenko O., Kariev A., Grigorova T. Design and research of environmental friendly polymeric materials modified by humic substances // AIP Conference Proceedings. 2023. № 2684. P. 040014. DOI: 10.1063/5.0119925
6. Herasymenko V., Kariev A., Balandaieva L., Lebedev V., Vynohradov V. Construction composites based on secondary thermoplastics and manufacturing waste // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2024. № 1376(1). P. 012011. DOI:10.1088/1755-1315/1376/1/012011
7. Yang H.S., Qiao P., Wolcott M.P. Fatigue characterization and reliability analysis of wood flour filled polypropylene composites // Polym. Composite. 2010. № 31(4). P. 553-560. DOI:10.1002/pc.20848
8. Benard C., Foix M., Grisel M. Effect of roughness and fiber reinforcement on the wettability of composite surfaces // Appl Surf Sci. 2007. № 253(10). P. 4753-4758. DOI:10.1016/j.apsusc.2006.10.049
9. Dominkovics Z., Dányádi L., Pukánszky B. Surface modification of wood flour and its effect on the properties of PP/wood composites // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2007. № 38(8). P. 1893-1901. DOI: 10.1016/j.compositesa.2007.04.001
10. Adjil I.S., Zainudin E.S., Abdan K., Sapuan S., Khairul M. Mechanical Properties and Water Absorption Behavior of a Hybrid Composite of High-Density Polyethylene Reinforced with Kenaf/Pineapple Leaf Fiber // Journal of Composite Materials. 2013. № 47(8). P. 979-990. DOI:10.1177/0021998312444147

References

1. The war in Ukraine and its impact on polymer production and supply in Russian Federation: first impressions. (2022). Journal of Modern Polymer Chemistry and Materials. <https://doi.org/10.53964/jmpcm.2022007>
2. Danchenko, Y., Andronov, V., Kariev, A., Lebedev, V., Rybka, E., Meleshchenko, R., & Yavorska, D. (2017b). Research into surface properties of disperse fillers based on plant raw materials. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(12 (89)), 20–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.111350>
3. Danchenko, Y., Kariev, A., Andronov, V., Cherkashina, A., Lebedev, V., Shkolnikova, T., Burlutskyi, O., Kosse, A., Lutsenko, Y., & Yavors'ka, D. (2020b). A research of chemical nature and surface properties of plant disperse fillers. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(6 (103)), 32–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.193383>
4. Danchenko, Y., Kariev, A., Lebedev, V., Barabash, E., & Obizhenko, T. (2020b). Physic-Mechanical Properties of Composites Based on Secondary Polypropylene and Dispersed of Plant Waste. Materials Science Forum, 1006, 227–232. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1006.227>
5. Lebedev, V., Tykhomyrova, T., Miroshnichenko, D., Filenko, O., Kariev, A., & Grigorova, T. (2023). Design and research of environmental friendly polymeric materials modified by humic substances. AIP Conference Proceedings, 2684, 040014. <https://doi.org/10.1063/5.0119925>
6. Herasymenko, V., Kariev, A., Balandaieva, L., Lebedev, V., & Vynohradov, V. (2024). Construction Composites Based on Secondary Thermoplastics and Manufacturing Waste. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 1376(1), 012011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1376/1/012011>
7. Yang, H., Qiao, P., & Wolcott, M. P. (2009). Fatigue characterization and reliability analysis of wood flour filled polypropylene composites. Polymer Composites, 31(4), 553–560. <https://doi.org/10.1002/pc.20848>
8. Bénard, Q., Fois, M., & Grisel, M. (2006). Roughness and fibre reinforcement effect onto wettability of composite surfaces. Applied Surface Science, 253(10), 4753–4758. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.10.049>
9. Dominkovics, Z., Dányádi, L., & Pukánszky, B. (2007). Surface modification of wood flour and its effect on the properties of PP/wood composites. Composites Part A Applied Science and Manufacturing, 38(8), 1893–1901. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.04.001>
10. Aji, I., Zainudin, E., Abdan, K., Sapuan, S., & Khairul, M. (2012). Mechanical properties and water absorption behavior of hybridized kenaf/pineapple leaf fibre-reinforced high-density polyethylene composite. Journal of Composite Materials, 47(8), 979–990. <https://doi.org/10.1177/0021998312444147>

Дата першого надходження рукопису до видання: 14.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 11.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

В. І. КРАВЧЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри гідротехнічного будівництва, водної
та електричної інженерії
Херсонський державний аграрно-економічний університет
ORCID: 0000-0003-2245-7194

ВИПРОБУВАННЯ ВОДОГРІЙНОГО КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТУ В РЕЖИМІ СПАЛЮВАННЯ КОМПОЗИТНИХ БІОПАЛИВНИХ ПЕЛЕТ, ВИГОТОВЛЕНИХ НА ОСНОВІ ОСАДІВ СТІЧНИХ ВОД

Стаття присвячена теплотехнічним випробуванням пелетного водогрійного котельного агрегату для опалювання приміщень. Як паливо для спалювання використовувалися композитні пелети, що склалися з осадів стічних вод (80%) та лушпиння соняшника (20%). Вибір композитного палива на основі осадів стічних вод пояснюється тим, що їх утилізація є нагальною проблемою всіх очисних споруд населених пунктів. Технологія очистки стічних вод, що застосовується на ОКВП «Дніпро-Кіровоград», не передбачає утилізацію мулових відходів, що утворюються на каналізаційних очисних спорудах, сировина з яких була надана для проведення досліджень. Серед низки методів переробки мулових осадів, одним із перспективних є термічна утилізація. Реалізація такого методу дозволить не тільки забезпечити вимоги до охорони довкілля, а і використовувати енергетичний ресурс таких відходів. Основною метою проведення теплотехнічних випробувань водогрійного котельного агрегату АОВА-20 в режимі спалювання партії зразків композитних біопаливних пелет на основі осадів стічних вод було визначення ККД котла. В роботі розроблено методика проведення теплотехнічних випробувань котельного агрегату. При теплотехнічних випробуваннях умови дослідження дозволили задіяти контур «водогрійний котел-система опалення», що дало можливість визначити ККД котельного агрегату на основі балансу за прямим методом. При застосуванні такого підходу до визначення ККД була розроблена методика визначення корисної теплоти Q_1 , витраченої в системі опалення і наявної теплоти Q_n , виділеної при спалюванні композитного біопалива. В результаті теплотехнічних випробувань котельного агрегату в режимі спалювання зразків біопаливних пелет, виготовлених на основі осадів стічних вод, визначений за методом прямого балансу ККД котельного агрегату становив 85%.

Ключові слова: осадки стічних вод, утилізація, композитні біопаливні пелети, водогрійний котельний агрегат, термічна утилізація, ККД котельного агрегату.

V. I. KRAVCHENKO

Candidate of Technical Science, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Hydraulic Construction, Water
and Electrical Engineering
Kherson State Agrarian and Economic University
ORCID: 0000-0003-2245-7194

TESTING OF A WATER HEATING BOILER UNIT IN THE COMBUSTION MODE OF COMPOSITE BIOFUEL PELLETS MADE ON THE BASIS OF SEWAGE SLUDGE

The article is devoted to thermal testing of a pellet water-heating boiler unit for heating premises. Composite pellets consisting of sewage sludge (80%) and sunflower husks (20%) were used as fuel for combustion. The choice of composite fuel based on sewage sludge is explained by the fact that their disposal is an urgent problem of all sewage treatment plants in settlements. The wastewater treatment technology used at the Dnipro-Kirovograd Wastewater Treatment Plant does not provide for the disposal of sludge waste generated at sewage treatment plants, the raw materials from which were provided for research. Among a number of methods for processing sludge, one of the most promising is thermal utilization. The implementation of such a method will allow not only to meet environmental protection requirements, but also to use the energy resource of such waste. The main purpose of conducting thermal tests of the AOVA-20 water heating boiler unit in the combustion mode of a batch of composite biofuel pellet samples based on sewage sludge was to determine the boiler efficiency. The work developed a methodology for conducting thermal tests of the boiler unit. During thermal tests, the research conditions allowed using the "water heating boiler-heating system" circuit, which made it possible to determine the boiler unit efficiency based on the balance using the direct method. When using this approach

to determining the efficiency, a methodology was developed for determining the useful heat Q_1 consumed in the heating system and the available heat Q_n released during the combustion of composite biofuel. As a result of thermal tests of the boiler unit in the combustion mode of biofuel pellet samples made on the basis of sewage sludge, the boiler unit efficiency determined by the direct balance method was 85%.

Key words: sewage sludge, utilization, composite biofuel pellets, hot water boiler unit, thermal utilization, boiler unit efficiency.

Постановка проблеми

Наявні в Україні технології очисних вод не передбачають утилізацію або використання осадів стічних вод (ОСВ), які утворюються на каналізаційних очисних спорудах [1]. Наразі згідно норм діючого законодавства у сфері водовідведення і водокористування [1] необхідно здійснювати утилізацію (переробку) свіжих та накопичених ОСВ, які роками зберігаються на мулових майданчиках КОС [2].

Серед низки способів їх переробки, найбільш перспективним методом, який набуває широкого розповсюдження у різних країнах, можна виділити термічну утилізацію [3, 4]. Технологічна реалізація зазначеного способу утилізації дозволяє не тільки зменшити обсяг ОСВ та забезпечити вимоги до охорони природного середовища, а й використати їх енергетичний ресурс.

Термохімічні процеси, зокрема спалювання, можуть стати домінуючими методами утилізації осадів стічних вод у найближчому майбутньому. Застосовуючи переробку у такий спосіб, можна досягнути ефективного скорочення обсягу осаду, повного знищення шкідливих речовин і можливість рекуперації значної кількості енергії, що міститься у стічних водах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

ОСВ характеризуються різними властивостями та мінливістю складу. Щоб підвищити енергетичний потенціал ОСВ, їх доцільно змішувати з іншими відходами, зокрема рослинними. Також, щоб осади були придатні для процесу спалювання, їх необхідно перетворити на форму відповідного палива, що застосовується при спалюванні, наприклад у пелетних котельних агрегатах [5].

В роботах [6,7] проведено дослідження по визначенню фізико-технічних умов використання мулових осадів стічних вод для виробництва біопалива та експериментально апробовано виготовлення його зразків, показано доцільність використання композитної сировини для виготовлення біопалива на основі мулових осадів стічних вод, теплота згоряння яких вище 18,0 МДж/кг.

В роботі [8] проведена підготовка до впровадження термічної утилізації мулових осадів ОКВП «Дніпро-Кіровоград» з визначенням технологічних умов, підбором пресового обладнання для виготовлення дослідної партії біопаливних пелет для теплотехнічних випробувань та вироблено на ньому зразки пелет із композитної сировини складом ОСВ-80% + лушпиння соняшника-20%. Загалом, останні літературні джерела підтверджують технічну здійсненність спалювання ОСВ разом з іншими відходами, або як композитного палива на основі осадів [9].

Формулювання мети дослідження

Основною метою теплотехнічних випробувань було визначення ККД водогрійного котельного агрегату в режимі спалювання партії зразків композитних біопаливних пелет на основі ОСВ.

Викладення основного матеріалу дослідження

Об'єктом теплотехнічних випробувань був водогрійний котел АОВА-20 виробництва ТДВ «Дозавтомати» (місто Кропивницький) [5], призначений для опалення приміщення площею 200 м².

Технічні характеристики котельного агрегату АОВА-20

Номінальна теплова потужність, ($Q_{ном}$), кВт	20
Площа обігріву, м ²	200
Витрата палива, кг/год	не більше 4,2
ККД, %	85-87
Максимальна температура води на виході, (T_{max}), °C	90
Робочий тиск в котлі, (P_p), МПа	не більше 0,1
Оптимальна витрата води, м ³ /год	0,5
Об'єм води в котлі, дм ³	70

Для спалювання як паливо використовувалися композитні біопаливні пелети діаметром 16 мм і щільністю $\rho = 870$ кг/м³, виготовлені на основі мулових осадів стічних вод складом: 80% мулові осади + 20% лушпиння соняшника. Загальний вигляд зразків композитних біопаливних пелет показано на рисунку 1.



Рис. 1. Зразки композитних пелет, виготовлених на основі ОСВ

Визначити коефіцієнт корисної дії котла в режимі спалювання композитних біопаливних пелет можна за методом теплового балансу [10-12].

Відомо, що ефективність використання палива в котлоагрегаті визначається двома основними факторами: повнотою процесу спалювання палива і глибиною охолодження продуктів згоряння.

Більша частина теплоти, яка вноситься у котельний агрегат сприймається поверхнями нагріву і передається робочому тілу. За рахунок цієї теплоти відбувається нагрів води до потрібної температури і це корисно спожита теплота. Решта теплоти, що складає приблизно 5...20% не використовується на нагрівання води. Це пояснюється втратами теплоти, що супроводжують роботу котла.

Розподіл корисної теплоти та внесеної теплоти у котлоагрегат проводиться шляхом складання теплового балансу котла. У загальному вигляді рівняння теплового балансу водогрійного котла при усталеному режимі роботи записується наступним чином [11]:

$$Q_n = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6. \quad (1)$$

де Q_n – наявна теплота на 1 кг робочого палива, кДж/кг;

Q_1 – корисно використана теплота, кДж/кг;

Q_2 – втрати теплоти з відхідними газами, кДж/кг;

Q_3 – втрати теплоти від хімічної неповноти згоряння, кДж/кг;

Q_4 – втрати теплоти від механічної неповноти згоряння, кДж/кг;

Q_5 – втрати теплоти у навколишнє середовище через огороження котла, кДж/кг;

Q_6 – втрати з фізичною теплотою шлаку, кДж/кг.

Якщо обидві частини рівняння (1) розділити на Q_n , то отримаємо

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 100\%. \quad (2)$$

Відношення корисної теплоти до наявної є коефіцієнт корисної дії (ККД);

$$Q_1 / Q_n = q_1 = \eta_k. \quad (3)$$

ККД котла може бути визначений за прямим або за зворотним балансом [10, 11]. Останнє рівняння є визначенням ККД котла за прямим балансом у загальному вигляді. ККД за зворотним балансом визначається за формулою

$$\eta_k = 100 - (q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6). \quad (4)$$

Наявна теплота у загальному випадку визначається за рівнянням:

$$Q_n = Q_n^p + Q_{нал} + Q_{пов.з} + Q_{форс}, \quad (5)$$

де Q_n^p – нижча теплота згоряння палива на робочу масу, кДж/кг;

$Q_{нал}$ – фізична теплота палива, кДж/кг;

$Q_{пов.з}$ – фізична теплота підігрітого повітря, кДж/кг;

$Q_{форс}$ – теплота, що вноситься парою при паровому розпиленні палива, кДж/кг.

При спалюванні у котлі АОВА-20 $Q_{пов.з} = Q_{форс} = 0$, а теплотою $Q_{нал}$ можна нехтувати. Тому для такого випадку $Q_n \approx Q_n^p$. Для умов проведення теплотехнічних випробувань приймалося [12]:

$$Q_n \approx M_n \cdot Q_n^p \quad (6)$$

де M_n – маса спалених композитних біопаливних пелет, кг.

Корисна теплота для котла АОБА- 20 визначалася за виразом [11,12]

$$Q_l = m_e c_e (t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}}), \quad (7)$$

де m_e – маса води, прокачана циркуляційним насосом через котел при усталеному режимі роботи котла за час проведення випробувань, кг;

c_e – теплоємність води, кДж/(кг·К);

$t_{\text{вх}}$ і $t_{\text{вих}}$ – температура води на вході і виході з котла, °С.

Тоді ККД котла можна визначити прямим методом:

$$\eta_k = Q_l / (B_n \cdot Q_n^p), \quad (8)$$

де B_n – маса композитних біопаливних пелет, витрачена за період роботи котла при усталеному режимі спалювання, кг.

При теплотехнічних випробуваннях котла АОБА-20 в режимі спалювання зразків пелет, виготовлених на основі мулових осадів стічних вод є можливість визначати всі складові рівнянь (7) і (8). За таких умов визначення ККД котла АОБА-20 при теплотехнічних випробуваннях можна скористатися методом прямого теплового балансу.

Випробування здійснювалося при роботі контура «водогрійний котел-система опалення» при усталеному режимі роботи котельного агрегату. На момент включення котла в роботу температура води на вході у котел була $t_{n1} = 8$ °С, а при випробуванні вона підвищилася до $t_{n2} = 55$ °С. Вимірювання температури під час проведення випробувань проводилося з використанням пірометра testo 830 T1, оснащеного 1-точковим лазером.

Насос Sprut GPD 32-8S для циркуляції води у контурі «водогрійний котел-система опалення» забезпечував витрату 0,5 м³/год. За три години витрата води склала 1,5 м³. Для умов, у яких проводилися випробування, можна вважати, система опалення виконувала функцію бойлера, і тому у рівнянні (7) можна прийняти: $t_{\text{вх}} = t_{n1} = 8$ °С і $t_{\text{вих}} = t_{n2} = 55$ °С. Тоді визначена згідно рівняння (7) корисна теплота $Q_l = 2,92 \cdot 10^5$ кДж.

За час роботи котла було спалено 19 кг композитних біопаливних пелет, виготовлених на основі мулових осадів. Розрахунки нижчої теплоти згоряння наданих композитних біопаливних пелет Q_n^p виконувалися за складом, наданим ОКВП «Дніпро-Кіровоград». Розрахована за формулою Менделєєва [8, 9] Q_n^p пелет склала 18 МДж/кг.

Визначений за рівнянням (8) ККД котла при теплотехнічних випробуваннях в режимі спалювання композитних біопаливних пелет, виготовлених на основі мулових осадів стічних вод, дорівнював 85%.

Основні результати теплотехнічних випробуваннях водогрійного котельного агрегату АОБА-20 в режимі спалювання композитних біопаливних пелет, виготовлених на основі мулових осадів стічних вод, приведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Основні результати теплотехнічних випробуваннях водогрійного котельного агрегату АОБА-20

№	Найменування	Од. виміров.	Величина
1	Котельний агрегат АОБА:		1
	Номінальна теплова потужність	кВт	20
	Оптимальна витрата води	м³/год	0,5
	Максимальна допустима температура води на виході, T_{max}	°С	90
2	Композитні біопаливні пелети, що спалюються:		
	Маса, M_n	Кг	19
	Склад:		
	Мулові осади стічних вод	%	80
3	Лущиння соняшника	%	20
	Час роботи котла при спалюванні пелет масою M_n в усталеному режимі, τ	год	3
4	Підігрів води у контурі циркуляції «водогрійний котел-система опалення» при випробуваннях: $\Delta t_{\text{min}} = t_{n2} (55 \text{ C}) - t_{n1} (8 \text{ C})$	°С	47
5	Кількість води, підігрітої у котлі при її циркуляції протягом часу випробувань, t_n	кг	1492
6	Нижча теплота згоряння наданого палива, Q_n^p	МДж	18
7	Корисна теплота Q_l	МДж	292
8	Наявна теплота, виділена при спалюванні палива, Q_n	МДж	342
9	ККД котла при теплотехнічних випробуваннях в режимі спалювання композитних біопаливних пелет,	%	85

Висновки

Розроблено методику проведення теплотехнічних випробувань водогрійного котельного агрегату АОБА-20 в режимі спалювання композитних біопаливних пелет на основі осадів стічних вод.

Для оцінки ефективності котельного агрегату в режимі спалювання біопаливних пелет ККД доцільно визначати за методом прямого теплового балансу.

Розроблено методику визначення ККД котельного з використанням контура «водогрійний котел-система опалення».

За результатами проведення теплотехнічних випробувань водогрійного котельного агрегату АОБА-20 в режимі спалювання композитних біопаливних пелет складом: 80% мулові осади стічних вод + 20% лушпиння соняшника на основі методу прямого теплового балансу визначено, що коефіцієнт його корисної дії дорівнює 85%.

Список використаної літератури

1. Кравченко В. І., Білоус Ю. В., Кравченко В. П. Створення та обґрунтування композитного палива на основі осаду стічних вод. *Технічні науки*. Херсон: ХДАЕУ, 2023. Вип. 3. С. 88–94. URL: <http://journals.ksauniv.ks.ua/index.php/tech/article/view/403>
2. Кравченко В. І. Виготовлення та експериментальна оцінка біопалива на основі осадів стічних вод для одержання теплової енергії та будівельного матеріалу. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 2 (89). С. 32–37. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.4>
3. Malhozhata V., Mariush T. Production of solid biofuel from city sewage sludge. Technical and economic optimization. *Waste Management & Research*. 2015. Vol. 33(8). URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0734242X15588584>
4. Nordin A. Co-combustion of municipal sewage sludge and biomass in a grate fired boiler for phosphorus recovery in bottom ash. *Energies*. 2020. Vol. 13(7). Article 1708. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13071708>
5. Каталог продукції заводу ТДВ «Дозавтомати». URL: <https://www.dozator.com.ua/products/kotel-aova-20>
6. Klymenko V., Kravchenko V., Koltun P., Nevdakha Yu., Zavodyannyi V. Evaluation of Technological Scenarios for Production of Composite Biofuels Based on Communal Waste. *Balancing Water-Energy-Food Security in the Era of Environmental Change*. 2025. P. 169–188. DOI: 10.4018/979-8-3693-5693-7
7. Кравченко В. І. Виготовлення та експериментальна оцінка біопалива на основі осадів стічних вод для одержання теплової енергії та будівельного матеріалу. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 2 (89). С. 32–37. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.4>
8. Клименко В. В., Невдаха Ю. А., Кравченко В. І. Застосування шнекового методу пресування водовмісної композитної сировини на основі мулових осадів стічних вод для виготовлення дослідно-промислової партії композиційних біопаливних пелет. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 12, ч. 1. С. 195–205. URL: [https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/12\(43\)_I/18.pdf](https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/12(43)_I/18.pdf)
9. Le Minh Quan, Kamyab H., Yuzir A., Veeramuthu A. Review of the application of gasification and combustion technology and waste-to-energy technologies in sewage sludge treatment. *Fuel*. 2022. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123199
10. Гелетука Г. Г., Жовмір М. М., Олійник Є. М., Радченко С. В. Особливості теплотехнічних випробувань водогрійних котлів з періодичним спалюванням цілих тюків солом. *Промислова теплотехніка*. 2010. Т. 32, № 6. С. 45–51.
11. Степанов Д. В., Корженко Є. С., Боднар Л. А. Котельні установки промислових підприємств: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2011. 120 с. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/4912>
12. Котельні установки : навчальний посібник / С. Й. Ткаченко, Д. В. Степанов, Л. А. Боднар. Вінниця: ВНТУ, 2016. 185 с. URL: <https://ctor.com.ua/wp-content/uploads/2024/05/Електроний-підручник.pdf>

References

1. Kravchenko, V. I., Bilous, Yu. V., & Kravchenko, V. P. (2023). *Stvorennia ta obgruntuvannia kompozytnoho palyva na osnovi osadu stichnykh vod* [Creation and justification of composite fuel based on sewage sludge]. *Tekhnichni nauky* [Technical Sciences], 3, 88–94. Retrieved from <http://journals.ksauniv.ks.ua/index.php/tech/article/view/403>
2. Kravchenko, V. I. (2024). *Vyhotovlennia ta eksperymentalna otsinka biopalyva na osnovi osadiv stichnykh vod dlia oderzhannia teplovoi enerhii ta budivelnogo materialu* [Production and experimental evaluation of biofuel based on sewage sludge for thermal energy and building material]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu* [Bulletin of Kherson National Technical University], 2(89), 32–37. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.4>
3. Malhozhata, V., & Mariush, T. (2015). Production of solid biofuel from city sewage sludge: Technical and economic optimization. *Waste Management & Research*, 33(8). <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0734242X15588584>
4. Nordin, A. (2020). Co-combustion of municipal sewage sludge and biomass in a grate fired boiler for phosphorus recovery in bottom ash. *Energies*, 13(7), 1708. <https://doi.org/10.3390/en13071708>
5. Dozavtomaty Plant. (n.d.). *Product catalog*. Retrieved from <https://www.dozator.com.ua/products/kotel-aova-20>
6. Klymenko, V., Kravchenko, V., Koltun, P., Nevdakha, Yu., & Zavodyannyi, V. (2025). Evaluation of technological scenarios for production of composite biofuels based on communal waste. In *Balancing Water-Energy-Food Security in the Era of Environmental Change* (pp. 169–188). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5693-7>
7. Kravchenko, V. I. (2024). *Vyhotovlennia ta eksperymentalna otsinka biopalyva na osnovi osadiv stichnykh vod dlia oderzhannia teplovoi enerhii ta budivelnogo materialu* [Production and experimental evaluation of biofuel based on

sewage sludge for thermal energy and building material]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu* [Bulletin of Kherson National Technical University], 2(89), 32–37. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.4>

8. Klymenko, V. V., Nevdakha, Yu. A., & Kravchenko, V. I. (2025). *Zastosuvannia shnekovoho metodu presuvannia vodovmisnoi kompozytnoi syrovyny na osnovi mulovykh osadiv stichnykh vod dlia vyhotovlennia doslidno-promyslovoi partii kompozytsiinykh biopalyvnykh pelet* [Application of screw pressing method for water-containing composite raw materials based on sewage sludge to produce a pilot batch of composite biofuel pellets]. *Tsentrlnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky* [Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences], 12(1), 195–205. [https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/12\(43\)_I/18.pdf](https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/12(43)_I/18.pdf)

9. Le Minh Quan, Kamyab, H., Yuzir, A., & Veeramuthu, A. (2022). Review of the application of gasification and combustion technology and waste-to-energy technologies in sewage sludge treatment. *Fuel*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123199>

10. Heletukha, H. H., Zhovmir, M. M., Oliinyk, Ye. M., & Radchenko, S. V. (2010). *Osoblyvosti teplotekhnichnykh vyprobuvan vodohriinykh kotliv z periodychnym spalniuvanniam tsilykh tiukiv solomy* [Features of thermal testing of hot-water boilers with periodic combustion of whole straw bales]. *Promyslova teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 32(6), 45–51.

11. Stepanov, D. V., Korzhenko, Ye. S., & Bodnar, L. A. (2011). *Kotelni ustanovky promyslovykh pidpriemstv: Navchalnyi posibnyk* [Boiler installations of industrial enterprises: Textbook]. Vinnytsia: VNTU. Retrieved from <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/4912>

12. Tkachenko, S. Y., Stepanov, D. V., & Bodnar, L. A. (2016). *Kotelni ustanovky: Navchalnyi posibnyk* [Boiler installations: Textbook]. Vinnytsia: VNTU. Retrieved from <https://ctor.com.ua/wp-content/uploads/2024/05/Електро-ний-підручник.pdf>

Дата першого надходження рукопису до видання: 20.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 17.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

H. I. KRAPYVKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Navigation and Ship Control
Kherson State Maritime Academy
ORCID: 0000-0002-8165-1213

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

ANALYSIS OF ENERGY INDICATORS OF SILICON AND CONCENTRATOR HETEROSTRUCTURE PHOTOELECTRIC MODULES IN CLIMATIC CONDITIONS OF THE MIDDLE ZONE OF UKRAINE

The implementation of distributed generation installations based on renewable energy sources in local power systems requires taking into account their local energy potential, especially for photovoltaic plants with their inherent variable generated power, depending on natural and meteorological conditions.

This work determines and analyzes the energy indicators of solar photovoltaic installations with modules based on crystalline silicon and concentrator A^3B^5 converters for the climatic conditions of the middle band of Ukraine.

Modeling of the annual specific energy production by photovoltaic installations was carried out based on the indicators of the Vinnytsia Hydrometeorological Center. The analysis showed that in this region of Ukraine, economically feasible energy generation by photovoltaic stations can be achieved, and the design scheme of the installation without concentration of solar radiation, but equipped with a system for tracking the position of the Sun, provides an increase in electricity generation compared to a system based on stationary modules. At the same time, the use of concentrator A^3B^5 modules in the considered climatic conditions turned out to be impractical, since this leads to a decrease in electricity generation by more than 7% even compared to a stationary photovoltaic installation based on silicon modules, which is explained by the exclusion of the scattered component of solar radiation from photovoltaic generation and energy losses in the optical concentrator.

The annual distribution of average daily electricity generation by photovoltaic installations with and without solar radiation concentrators in the climatic conditions of Vinnytsia was experimentally investigated.

The analysis of the obtained results showed that in the climatic conditions of the middle zone of Ukraine, photovoltaic installations with a capacity of up to a few kilowatts should be composed of stationary modules of non-concentrated radiation. At the same time, for installations of higher power and photovoltaic stations of the megawatt class, it is worth using schemes with tracking the position of the Sun without concentration of the light flux.

Key words: photovoltaic panel; solar insolation; concentrated radiation; spatial orientation system; electricity generation.

Г. І. КРАПИВКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри навігації та управління судном
Херсонська державна морська академія
ORCID: 0000-0002-8165-1213

В. В. КУРАК

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетики, електротехніки і фізики
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-4303-5671

АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ КРЕМНІЄВИХ ТА КОНЦЕНТРАТОРНИХ ГЕТЕРОСТРУКТУРНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ В КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ СЕРЕДНЬОЇ СМУГИ УКРАЇНИ

Впровадження установок розподіленої генерації на відновлюваних джерелах енергії в локальних енергосистемах потребує врахування їх місцевого енергетичного потенціалу, особливо для фотоелектричних станцій з прикриттям мінливою генерованою потужністю, залежною від природних та метеорологічних умов.

В даній роботі визначено та проаналізовано енергетичні показники сонячних фотоелектричних установок з модулями на основі кристалічного кремнію та концентраторних перетворювачів зі сполук A^3B^5 для кліматичних умов середньої смуги України.

Моделювання річного питомого вироблення енергії фотоелектричними установками проведено на основі показників Вінницького гідрометцентру. Аналіз показав, що в даному регіоні України може бути досягнуто економічно доцільне вироблення енергії фотоелектричними станціями, а конструктивна схема установки без концентрації сонячної радіації, але оснащеної системою стеження за положенням Сонця, забезпечує збільшення вироблення електроенергії порівняно з системою на основі нерухомих модулів. В той же час, застосування концентраторних модулів A^3B^5 в розглянутих кліматичних умовах виявилось недоцільним, оскільки це призводить до зменшення вироблення електроенергії на понад 7% навіть в порівнянні з нерухомою фотоелектричною установкою на основі кремнієвих модулів, що пояснюється виключенням з фотоелектричної генерації розсіяної складової сонячного випромінювання та втратами енергії у оптичному концентраторі.

Експериментально досліджено річний розподіл середньодобового вироблення електроенергії фотоелектричними установками з концентраторами сонячного випромінювання та без них в кліматичних умовах м. Вінниці.

Аналіз отриманих результатів показав, що в кліматичних умовах середньої смуги України фотоелектричні установки потужністю до одиниць кіловат доцільно компонувати з нерухомих модулів неконцентрованого випромінювання. В той же час, для установок більшої потужності та фотоелектричних станцій мегаватного класу варто використовувати схеми зі стеженням за положенням Сонця без концентрації світлового потоку.

Ключові слова: фотоелектричний модуль; сонячна інсоляція; концентроване випромінювання; система просторової орієнтації; електрична генерація.

Problem Statement

Decentralization of the energy sector with an orientation towards the development of distributed generation is one of the key directions of energy development, the support of which is declared in strategic documents of the state level [1]. The implementation of distributed generation installations based on renewable energy sources in local energy systems requires taking into account their local energy potential, especially for photovoltaic plants (PVs) with their inherent variable generated power, depending on natural and meteorological conditions.

The assessment of the efficiency of solar power plants with tracking devices, but located in different climatic zones, is often impossible due to non-repeatable or difficult to reproduce artificial insolation regimes. Therefore, the calculations mainly use the averaged monthly values of the hourly change in the intensity of the direct solar energy flux under clear sky conditions, given in actinometric reference books. But they also reflect local features of insolation, expressed, for example, by local deviations from symmetry relative to noon. In this regard, it is proposed to carry out an energy assessment using hourly values of the intensity of the direct solar energy flux, calculated using unambiguously regulated parameters of atmospheric transparency.

Analysis of recent studies and publications

The amount of solar energy received by the receiving surface depends on the characteristics of the radiation climate at a given point and the design scheme of the installation [2]. The most energy-efficient design scheme of a photovoltaic power plant is a scheme based on modular photovoltaic installations with two-axis tracking of the position of the Sun [3]. Such a scheme, which was used during the research, is presented in Fig. 1. In it, the photovoltaic installation rotates in height and azimuth for constant orientation to the Sun.

The specified scheme provides for the possibility of using the PV system both with and without solar radiation concentrators. In this installation, which provides the condition $\chi \Rightarrow 0$, where χ – is the angle of incidence of direct solar radiation, every concentrating systems can be applied.

Formulation of the research goal

The goal of this work is to analyze the energy performance of solar photovoltaic installations with and without the two-axis tracking system for the climatic conditions of the middle zone of Ukraine.

Presentation of the main research material

Solar radiation reaches the earth's surface in the form of direct rays from the solar disk (direct solar radiation) and in the form of scattered radiation from the sky (diffuse solar radiation). The sum of direct and scattered radiation reaching a certain surface constitutes the total solar radiation.

Since the area of a solar installation can be different and vary within quite wide limits, it is advisable to calculate the solar radiation inflow per 1m^2 of the receiving surface of the installation.

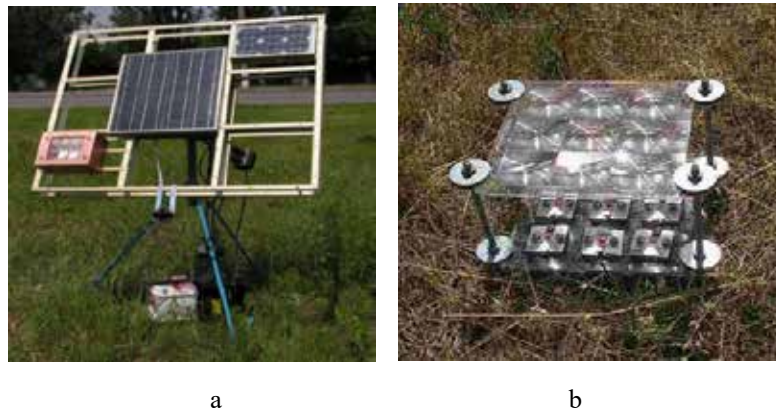


Fig. 1. Photovoltaic installation with two-axis tracking of the position of the Sun (a) and the module of A³B⁵ photovoltaic converters with Fresnel lenses (b)

In general, the inflow of direct solar radiation during the day to a certain fixed or rotating surface can be expressed by the formula:

$$P_{dn}^* = \sum_{t_1}^{t_2} [(P)r * \cos \chi], \quad (1)$$

where $(P)r$ is the average inflow of direct solar radiation to a surface normal to the rays for a given time interval in the current month; t_1 and t_2 are the start and end times of irradiation of the surface under consideration by direct solar radiation; χ – is the angle of incidence of direct solar radiation on the surface under consideration at the current time t .

Multiplying P_{dn}^* by the number of days in the current month, we obtain the average monthly inflow of direct solar radiation to the surface under consideration, and summing the monthly values, we find the annual amount.

Similarly, by summing the average hourly values of scattered radiation, it is possible to determine the average daily value of the scattered radiation D_{dn}^* for a given month according to the equation:

$$D_{dn}^* = \sum_{t_1}^{t_2} [(D)_h (K)_h], \quad (2)$$

where $(D)_h$ is the average incoming scattered solar radiation to a horizontal surface for a given time interval in the current month; $(K)_h$ is the conversion factor for the incoming scattered radiation to the surface under consideration, referred to the middle of the current hourly interval for a given month.

The introduction of the specified conversion factor $(K)_h$ is necessary, since information on the average hourly values of scattered radiation is available only for a horizontal surface, and the surface under consideration can be inclined to it at different angles. The value $(K)_h$ is determined by the ratio of that part of the celestial hemisphere that the receiving surface "sees" at the moment to the full hemisphere, which in turn depends on the angle of inclination of the surface under consideration. The part of the celestial hemisphere "visible" by an inclined plane is a spherical dihedral with an angle equal to $(\pi - a)$, where a – is the angle of inclination of this plane to the horizontal surface.

Then, if the angle a is measured in degrees, we have:

$$(K)_h = (1 - a / 180) h. \quad (3)$$

Formula (3) is obtained under the assumption of uniform distribution of scattered radiation over the celestial hemisphere, which is quite valid, especially in the case of a completely clear sky. However, this assumption is the only possible one, since there are no reliable statistical models of the distribution of scattered radiation over the sky, especially for the sky partially or completely covered by clouds. The average daily sum of the total radiation is determined by adding the right-hand sides of expressions (1) and (2). When using these expressions, the values of P_{dn}^* and D_{dn}^* can be taken from [4], and the values of $(1 - a / 180)_h$ must be calculated.

For the angle of incidence of solar rays the expression [5] is valid:

$$\cos \chi = \sin h \cos a + \cos h \cos A \sin a, \quad (4)$$

where h and A are the height of the Sun and its azimuth at a given time.

However, h and A are themselves functions of the latitude φ , time of day t and season, which can be expressed in terms of the declination of the Sun δ . Omitting intermediate transformations, we arrive at the equation:

$$\cos\chi = \sin\delta \left[\sin\varphi \cos\alpha + \sin\alpha \left(\sin\varphi \tan\varphi - \frac{1}{\cos\varphi} \right) \right] + (\cos\varphi \cos\alpha + \sin\varphi \sin\alpha) \cos\delta \cos t. \quad (5)$$

For the installation shown in Fig.1(a), which is a system with automatic orientation to the position of the Sun, $\chi = 0$, and the value $(1 - a/180)_{\text{год}}$ is found according to the equation:

$$\left(1 - \frac{a}{180} \right)_{\text{год}} = 1 - [90 - \arcsin(\sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos t)] / 180. \quad (6)$$

Thus, using formulas (1)–(6), it is possible to calculate the direct, diffuse, total solar radiation on the receiving surface of a modular photovoltaic installation for any given time interval.

The next stage of calculations is to determine the electricity generation by a photovoltaic installation. Not all solar energy that has reached the surface of the installation can be effectively converted into electricity. Regarding photovoltaic converters (PVCs), the limiting factor is the voltage, which at a low solar radiation flux density decreases below the nominal level, which makes it impossible to meet the needs of the consumer. Therefore, solar energy that arrives at a flux density less than a certain "threshold" value cannot be used.

Taking into account the above, the calculation of the average daily electricity production in a certain month in specific terms, i.e. per 1m^2 of the receiving surface of the photovoltaic module, for installations with solar radiation concentrators is carried out according to the formula:

$$A_{dn}^* = P_{dn}^*(\eta)_0, \quad (7)$$

where $(\eta)_0$ – efficiency of the optical concentrating system (taken at the level of 0.875); η – efficiency of conversion of solar energy into electricity, the value of which for the studied silicon PVs was taken equal to 0.188, and for concentrator A³B⁵ PVs – 0.236 [6].

The calculation in specific terms is universal, since the electricity generation of a particular designed installation can be easily calculated by multiplying the specific generation by the receiving area of this installation. For a specific installation with known values of $(\eta)_0$ and η , the electricity generation is found by proportional conversion.

The average daily specific electricity generation in the calculated month by photovoltaic installations without solar radiation concentrators is determined by the expression:

$$A_{dn}^* = (P_{dn}^* + D_{dn}^*), \quad (8)$$

in which D_{dn}^* takes into account the limitations on the maximum density of scattered radiation.

Knowing the average daily specific electricity generation in each month, it is not difficult to determine the energy generation throughout the year.

Calculations according to the above-mentioned method were carried out by the Regional Hydrometeorological Center of Vinnytsia (49.23 N). The entire array of calculation results is presented in a table, which shows the value of the specific annual electricity production for a photovoltaic modular installation, made according to the structural scheme of Fig. 1 with solar radiation concentrators (K) and without them (B/K). Data on the estimated annual electricity production are presented in Table 1.

Table 1

Estimated annual electricity production PVCs, kWh/m²

Point Geographical	Latitude, degrees N	Stationary (B/K)	Tracking (K)	Tracking (B/K)
Vinnytsia	49.23	154.2	142.4	206.0

The obtained calculation results confirmed the a priori qualitative statement that the volume of electricity generation by photovoltaic installations is greater in the area where the solar climate is more favorable [7]. Thus, from the data in Table 1 it is clear that in the considered region of Ukraine, which belongs to the "solar" region, economically justified energy generation can be achieved [8]. However, quantitative indicators for this region regarding the volume of energy generated using installations with a two-axis system for tracking the position of the Sun were obtained for the first time.

From the data presented in Table 1, it also follows that in the absence of solar radiation concentrators, the design scheme associated with the rotation of photovoltaic modules provides an increase in electricity generation compared to a fixed module. At the same time, the use of concentrating systems reduces electricity generation both by eliminating the scattered component of solar radiation and due to losses in the optical concentrator.

Reduction of specific annual energy generation for a scheme with a concentrator compared with a fixed scheme is more than 7%. Increasing the efficiency of photovoltaic installations with concentrators at a fixed level of photovoltaic

conversion efficiency is possible only by increasing the efficiency of the concentrating system (η)₀. For example, if (η)₀ is increased from the value adopted in the calculation of 0.875 to 1, electricity generation will increase by 12.5%.

From the data in Table 1 it also follows that the scheme, which involves the orientation of the photovoltaic module without the concentration of the light flux, gives the best results, which is quite natural, since the condition $\chi = 0$ is met.

Since the data available in the literature on the parameters of PVCs at low illumination are contradictory, relate to different types of PVCs and therefore cannot be taken as a reliable basis, this circumstance required the setting up of an experiment, which was carried out on a laboratory stand, the block diagram of which is presented in Fig. 2. The information was recorded on a recorder during the calendar year 2021.

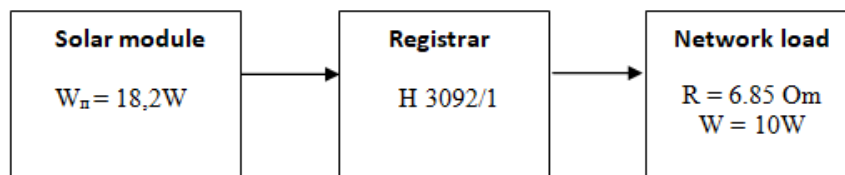


Fig. 2. Block diagram of the laboratory stand

The object of the study was silicon PVCs obtained from rice husks, as well as concentrator A³B⁵ PVCs with Fresnel lenses [6].

It has been established that when using solar concentrators, the flux density of direct solar radiation on the module surface is always higher than the threshold value. Thus, all direct solar radiation arriving at the module surface can be converted into electrical energy and used in the load.

For photovoltaic installations without concentrators, in the presence of direct solar radiation, the fraction of radiation with a density less than the threshold is small. However, in the absence of direct solar radiation, the influx of scattered radiation with a flux density less than the threshold value can constitute a significant part of the total influx of scattered radiation. As the analysis has shown, such a decrease depends only on the climatic indicators of the location of the PV plant. It is more significant for areas characterized by the largest fraction of scattered radiation in the influx of solar energy. The specified restriction on the threshold value of the scattered radiation flux density reduces the total annual intake of total radiation that can be converted into electricity by 10-20%.

The nature of the energy source used by photovoltaic installations is such that its intake varies in daily and annual intervals. Accordingly, the power of the installations and their electricity generation also change. Daily patterns of power changes are more clearly visible during a clear day. The annual course of electricity generation is significantly affected by both the latitude factor and the climatic characteristics of the location of the PV plant.

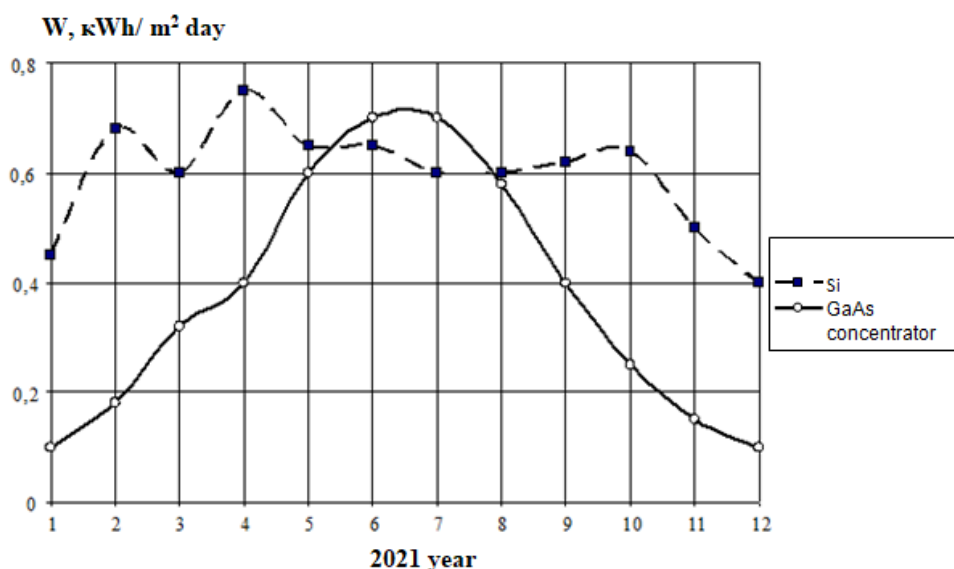


Fig. 3. Distribution of specific electricity generation by months (Vinnytsia, 2021)

Fig. 3 represents the annual course of the specific average daily electricity generation by a photovoltaic installation in the climatic conditions of the city of Vinnytsia ($\varphi = 49.23^\circ$ N) according to the results of measurements during 2021.

It is worth noting that the obtained experimental values of monthly and annual energy generation by photovoltaic installations are the upper limit of these values, since such factors as energy consumption for the PV plant's own needs, for example, for rotating modules, the discrepancy between the real load and the maximum power point on the ampere-voltage characteristic of the photovoltaic installation, energy losses in the inverter that converts direct current into alternating current of the required frequency and voltage, etc. are not taken into account.

Conclusions

A comparison of the efficiency of various design schemes of modular photovoltaic installations leads to conclusions that are significant for practice.

Thus, the use of solar radiation concentrators allows to significantly reduce the consumption of photoconverters per unit of installation power but leads to a decrease in the specific annual electricity generation even in comparison with a stationary photovoltaic module.

The use of systems with optical concentrators reduces the average annual electricity production compared to modules of non-concentrated solar radiation due to the exclusion of the scattered component of solar radiation from the process of photovoltaic conversion and the presence of energy losses in the concentrators. Thus, in the climatic conditions of Vinnytsia, the reduction in specific annual energy production for a scheme with concentrators compared to concentrator-free installations ranges from 7% to 30%, depending on whether the modules of non-concentrated radiation are equipped with a system for tracking the position of the Sun.

The efficiency of photovoltaic installations with concentrators can be increased at a fixed photovoltaic conversion efficiency by increasing the efficiency of the concentrating system (η)₀. Thus, with an increase in (η)₀ from 0.875 to 1, electricity production will increase by 12.5%.

Therefore, in the climatic conditions of the middle zone of Ukraine, photovoltaic installations of low power, up to units of kilowatts, are advisable to be composed of stationary modules. At the same time, for installations of higher power and megawatt-class photovoltaic power plants, from an energy point of view, it is advisable to use schemes with tracking the position of the Sun without radiation concentration.

Bibliography

1. Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на 2021–2027 роки. Постанова Кабінету Міністрів України від 5 серпня 2020 р. №695 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020%D0%BF#Text> (дата звернення: 23.10.2025). Назва з екрану.
2. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2013. 910 p. DOI: 10.1002/9781118671603
3. Данко В.М., Смутко С.В., Поліщук О.С. Розробка конструкції трекерної системи для сонячних панелей. *Вісник Хмельницького національного університету*. № 1 (245). 2017. С. 232-235.
4. Дані щодо прямої та розсіяної сонячної радіації у м. Вінниця за 2018 р. Державна гідрометеорологічна служба (Вінниця), довідка № 01-45/488 від 05.01.19 р.
5. Гуральник І.І., Дубинський Г.П., Ларін В.В., Мамиконова С.В. Метеорологія. К.: Гідрометеоіздат, 1982. 440с.
6. Звіт про науково-технічну роботу «Сонячні фотоелектричні енергоустановки з концентраторами випромінювання» інв. № М/174-2004 Херсонський державний технічний університет. 2004. С. 36.
7. Резцов В.Ф., Матях С.В., Кудреватих О.О. Інтерактивна карта потенціалу сонячної енергії України. *Відновлювана енергетика*. № 4. 2018. С. 34–42.
8. Гаєвський О.Ю., Іванчук В.Ю., Корнієнко І.О. Система вимірювання параметрів фотоелектричних модулів в реальних умовах експлуатації. *Відновлювана енергетика*. № 2. 2019. С. 32–39. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).32-39](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).32-39)

References

1. On approval of the State Strategy for Regional Development for 2021–2027. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated August 5, 2020 No. 695 [Electronic resource]. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020%D0%BF#Text> (last access: 23.10.2025). Title from the screen.
2. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2013. 910 p. DOI: 10.1002/9781118671603
3. Danko V.M., Smutko S.V., Polischuk O.S. (2017) Rozrobka konstruktsiyi trekernoyi systemy dlya sonyachnykh paneley [Development of construction of the tracking system for solar panels]. *Herald of Khmelnytskyi national university*, no.1 (245), pp. 232-235. [in Ukrainian].
4. Data on direct and diffuse solar radiation in Vinnytsia for 2018. State Hydrometeorological Service (Vinnytsia) reference No. 01-45/488 dated 01.05.19.

5. Guralnyk I.I., Dubynskyi G.P., Larin V.V., Mamikonova S.V. Meteorolohiya [Meteorology]. Kyiv: Gidrometeoizdat, 1982. 440p. [in Ukrainian].
6. Report on scientific and technical work "Solar photovoltaic power plants with radiation concentrators" № М/174-2004. Kherson State Technical University, 2004, p. 36.
7. Reztsov V.F., Matyakh S.V., Kudrevatykh O.O. (2018) Interaktyvna karta potentsialu sonyachnoyi enerhiyi Ukrayiny [Interactive map of the potential of solar energy in Ukraine]. *Renewable Energy*, no.4., pp. 34–42. [in Ukrainian].
8. Gaevsky O.Yu., Ivanchuk V.Yu., Kornienko I.O. (2019) Systema vymiryuvannya parametriv fotoelektrychnykh moduliv v real'nykh umovakh ekspluatatsiyi [A system for measurements of the PV module parameters in real operational conditions]. *Renewable Energy*, no.2, pp. 32–39. [in Ukrainian]. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).32-39](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).32-39)

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

Ю. О. ЛЕБЕДЕНКО

кандидат технічних наук,
доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0002-1352-9240

І. І. КРИВОШЕЄНКО

магістрант кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0009-0002-9047-1131

Н. В. БУНДА

магістрант кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0009-0009-6932-260X

АВТОМАТИЗАЦІЯ РЕСУРСНИХ ВИПРОБУВАНЬ ПОБУТОВОЇ ТЕХНІКИ НА ОСНОВІ РОБОТИЗОВАНОГО КОМПЛЕКСУ З СИСТЕМОЮ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ

Стаття присвячена проблематиці автоматизації ресурсних випробувань побутової техніки в умовах сучасних вимог до якості та безпеки продукції. Ресурсні випробування розглядаються як ключовий етап забезпечення надійності, довговічності та відповідності нормативним стандартам. Зростання конкуренції на ринку, підвищення очікувань споживачів та посилення регуляторних вимог актуалізують необхідність удосконалення методів тестування. Традиційні підходи, що ґрунтуються на ручному виконанні процедур, мають суттєві обмеження, зокрема низьку продуктивність, суб'єктивність оцінки та недостатні можливості моніторингу. У контексті концепції Індустрії 4.0 особливого значення набуває впровадження роботизованих комплексів із системами технічного зору, здатних забезпечити автоматизацію процесу випробувань та формування об'єктивної, відтвореної оцінки стану виробів. Проаналізовано сучасні методи ресурсних випробувань та визначено їх обмеження. Запропоновано структуру автоматизованого комплексу, що включає шестиосьовий маніпулятор Mitsubishi RV-2AJ із високою повторюваністю позиціонування, систему сенсорів для контролю механічних та електричних параметрів, а також підсистему комп'ютерного зору для візуальної діагностики. Роботизована підсистема забезпечує повторюваність механічних дій, контроль прикладених навантажень та синхронізацію з візуальною діагностикою, що суттєво підвищує об'єктивність випробувань. Підсистема комп'ютерного зору базується на промисловій високороздільній камері з апаратною синхронізацією та контрольованим освітленням. Зображення маркується метаданими та передається для аналізу неймерережею, яка виявляє візуальні дефекти та класифікує стан деталей. Така інтеграція забезпечує можливість кореляції функціональної деградації з візуальними ознаками пошкоджень для глибшого аналізу механізмів відмов. Розроблений комплекс реалізовано у форматі прототипу та проведено експериментальні випробування побутових приладів. Результати підтверджують ефективність запропонованого підходу: підвищення об'єктивності контролю, зменшення трудовитрат, прискорення циклів тестування та отримання комплексних звітів, що поєднують функціональні та візуальні індикатори деградації. Запропонований підхід може бути впроваджений у виробничих лабораторіях підприємств побутової техніки, центрах сертифікації та навчальних закладах.

Ключові слова: ресурсні випробування, побутова техніка, автоматизація, роботизований комплекс, комп'ютерний зір, машинне навчання, контроль якості, технічний зір, Індустрія 4.0.

YU. O. LEBEDENKO

Ph.D. in Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Information
and Computer Technologies
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0002-1352-9240

I. I. KRYVOSHEIENKO

Master's Student at the Department of Information
and Computer Technologies
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0009-0002-9047-1131

N. V. BUNDA

Master's Student at the Department of Information
and Computer Technologies
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0009-0009-6932-260X

AUTOMATION OF RESOURCE TESTING OF HOUSEHOLD APPLIANCES BASED ON A ROBOTIC COMPLEX WITH A MACHINE VISION SYSTEM

The article is devoted to the problem of automating resource testing of household appliances under modern requirements for product quality and safety. Resource testing is considered a key stage in ensuring reliability, durability, and compliance with regulatory standards. Increasing market competition, rising consumer expectations, and stricter regulatory demands emphasize the need to improve testing methodologies. Traditional approaches, based on manual execution of procedures, are limited by low productivity, subjective evaluation, and insufficient monitoring capabilities. Within the framework of Industry 4.0, particular importance is attached to the implementation of robotic complexes with machine vision systems, capable of automating the testing process and providing objective, reproducible assessment of product condition.

Modern methods of resource testing are analyzed and their limitations identified. A structure of an automated complex is proposed, which includes a six-axis Mitsubishi RV-2AJ manipulator with high positioning repeatability, a sensor system for monitoring mechanical and electrical parameters, and a computer vision subsystem for visual diagnostics. The robotic subsystem ensures repeatability of mechanical actions, control of applied loads, and synchronization with visual diagnostics, significantly increasing the objectivity of testing. The computer vision subsystem is based on an industrial high-resolution camera with hardware synchronization and controlled lighting. Images are tagged with metadata and transmitted for neural network analysis, which detects visual defects and classifies the condition of components. This integration enables correlation of functional degradation with visual signs of damage, providing deeper insight into failure mechanisms.

The developed complex has been implemented as a prototype and experimental testing of household appliances has been conducted. The results confirm the effectiveness of the proposed approach: improved objectivity of control, reduced labor costs, accelerated testing cycles, and generation of comprehensive reports combining functional and visual indicators of degradation. The proposed approach can be applied in production laboratories of household appliance enterprises, certification centers, and educational institutions.

Key words: resource testing, household appliances, automation, robotic complex, computer vision, machine learning, quality control, technical vision, Industry 4.0.

Постановка проблеми

Ресурсні випробування побутової техніки є невід'ємною складовою процесу забезпечення якості продукції і гарантування її відповідності вимогам надійності й безпеки. Зростання конкуренції на ринку, підвищення вимог споживачів до зовнішнього вигляду та довговічності виробів, а також посилення нормативних стандартів висувають жорсткіші вимоги до методів випробувань [1].

Традиційні підходи до ресурсних випробувань, що базуються на ручному моделюванні дій користувача, характеризуються рядом суттєвих недоліків. По-перше, вони є трудомісткими та вимагають значних витрат часу, особливо для циклічних тестів, де необхідно виконати тисячі повторюваних операцій. По-друге, ручне виконання операцій неминуче призводить до варіативності параметрів впливу – зусиль натискання, швидкості дій, траєкторій переміщень, що знижує відтворюваність результатів. По-третє, візуальна оцінка стану виробів під час випробувань є суб'єктивною і залежить від кваліфікації та уважності оператора, що особливо критично при багатоденних або багатоденних випробуваннях, коли втома людини неминуче впливає на якість контролю.

У контексті концепції Індустрії 4.0 особливої актуальності набуває використання роботизованих комплексів, які можуть імітувати реальні сценарії експлуатації побутових приладів з високою повторюваністю, здійснювати контроль навантажень та фіксувати параметри впливу за допомогою сенсорних систем [2]. Водночас, для повноцінної оцінки стану виробів необхідно не лише контролювати функціональні параметри (електричні характеристики, механічні зусилля, температурні режими), але й відстежувати візуальні зміни – появу тріщин, деформацій, знебарвлення, зношування поверхонь, порушення цілісності декоративних покриттів тощо. Інтеграція підсистем комп'ютерного зору в роботизовані випробувальні комплекси дозволяє автоматизувати процес візуальної діагностики, забезпечити об'єктивну та документовану оцінку візуальних дефектів, а також встановити кореляції між функціональною деградацією та візуальними змінами виробів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання автоматизації ресурсних випробувань та застосування роботизованих систем у промисловому тестуванні активно досліджуються у світовій науковій спільноті. Проведення ресурсних випробувань побутової техніки регламентується комплексом міжнародних та національних стандартів, зокрема серією ІЕС 60335, що визначає вимоги безпеки електричних побутових приладів [1]. Стандарти встановлюють мінімальні вимоги до кількості циклів роботи, які виріб повинен витримати при номінальних параметрах. Наприклад, для автоматичних вимикачів застосовуються стандарти ІЕС 60898 та ІЕС 60947-2, які визначають від 10000 до 20000 циклів увімкнення-вимкнення при номінальному струмі залежно від класу пристрою.

У роботі [5] детально розглянуто концепцію Індустрії 4.0, що передбачає глибоку інтеграцію фізичних виробничих процесів з цифровими технологіями. Ключовими технологіями Індустрії 4.0 є Інтернет речей (IoT), що дозволяє підключати випробувальне обладнання до єдиної мережі; великі дані та аналітика (Big Data & Analytics) для обробки величезних обсягів інформації; штучний інтелект та машинне навчання для інтерпретації результатів; цифрові двійники для моделювання процесів деградації; хмарні обчислення для централізованого зберігання даних.

Паралельно розвиваються технології комп'ютерного зору для промислового контролю якості [3]. Системи технічного зору складаються з декількох ключових компонентів: джерела світла та системи освітлення, оптичного об'єктиву, камери (зазвичай на базі CMOS або CCD сенсорів), модуля обробки зображень та системи прийняття рішень. Освітлення є критично важливим елементом, оскільки воно безпосередньо впливає на якість отриманого зображення та здатність системи виявляти дефекти.

Застосування глибокого навчання (Deep Learning) у комп'ютерному зорі докорінно змінило підходи до виявлення дефектів. Глибинне навчання та згорткові нейронні мережі (CNN) [7], що стали стандартом де-факто для задач класифікації зображень, на відміну від традиційних методів, що вимагають ручного проектування ознак, автоматично навчаються виділяти релевантні характеристики безпосередньо з вихідних зображень, що значно підвищує точність розпізнавання.

Водночас, наявні дослідження переважно розглядають роботизовані системи випробувань та системи комп'ютерного зору як окремі напрямки. Роботи, присвячені автоматизації випробувань, зосереджуються на механічному виконанні дій та контролі функціональних параметрів, але не приділяють достатньої уваги візуальній діагностиці. З іншого боку, дослідження систем технічного зору фокусуються на виявленні дефектів, але не розглядають їх у контексті динамічного моніторингу стану виробів під час тривалих циклічних випробувань. Інтеграція цих технологій у єдиний комплекс для ресурсних випробувань побутової техніки залишається мало-дослідженою проблемою, що визначає актуальність даної роботи.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розробка роботизованого випробувального комплексу з інтегрованою підсистемою комп'ютерного зору, що забезпечує автоматизовану, об'єктивну та відтворювану оцінку візуальних і функціональних змін побутової техніки під час ресурсних випробувань.

Викладення основного матеріалу дослідження

Роботизований комплекс для ресурсних випробувань побутової техніки є складною мехатронною системою, що включає механічну підсистему, систему керування, сенсорні модулі та програмне забезпечення для збору й аналізу даних.

Структуру випробувального стенду наведено на рис. 1. Для повноти оцінки стану зразка під час циклічних випробувань комплекс обладнано системою сенсорів, що включає: датчики сили та моменту для контролю механічних впливів (діапазон 0-50 Н, точність 0.1 Н); датчики температури для моніторингу теплового режиму (діапазон -20...+150°C, точність 0.5°C); вимірювачі електричних параметрів (струм до 16 А, напруга до 400 В, потужність до 3.5 кВт); акустичні датчики для аналізу звукових характеристик (частотний діапазон 20 Гц – 20 кГц); датчики вібрації для виявлення аномальних коливань (діапазон 0-500 Гц).

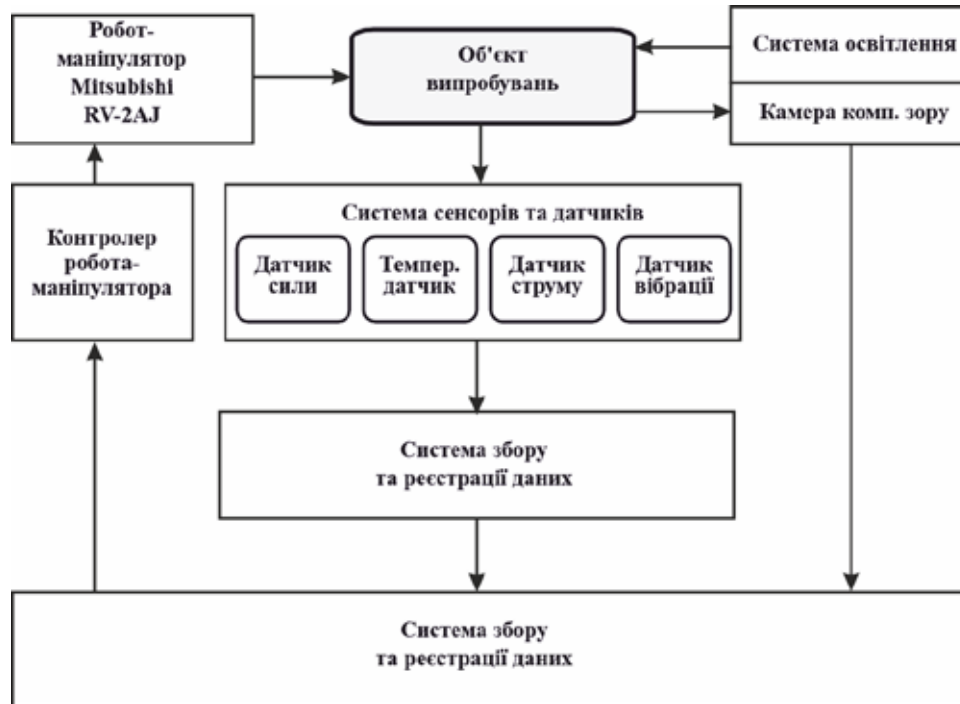


Рис. 1. Структура роботизованого випробувального комплексу

В якості робочого органу комплексу застосовано Mitsubishi RV-2AJ – компактний шестиосьовий маніпулятор із високою повторюваністю позиціонування та достатнім робочим радіусом для охоплення зон випробувального стенда [2] (рис. 2).

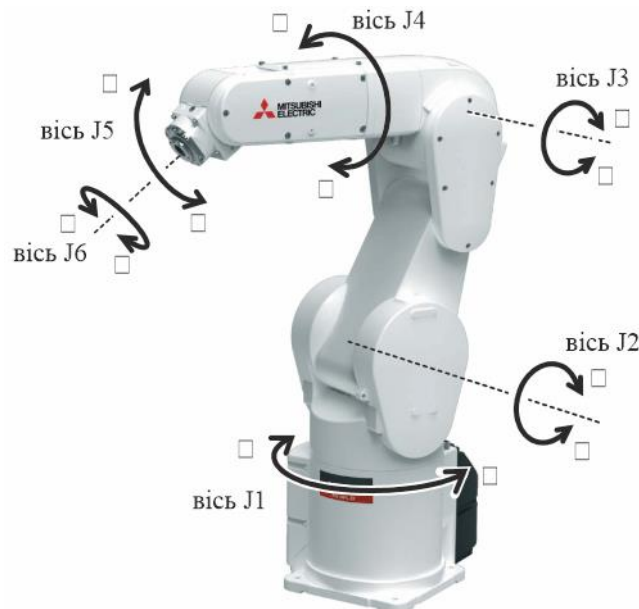


Рис. 2. Загальний вигляд шестиосового маніпулятора Mitsubishi RV-2AJ

Маніпулятор забезпечує виконання стандартних операцій випробувань: натискання кнопок та перемикачів, обертання регуляторів, переміщення об'єктів, захоплення та звільнення деталей, а також комбіновані рухи з заданими профілями швидкості і прискорення. Приклад фрагмента програми у форматі MELFA BASIC для випробування автоматичного вимикача (рис. 3) демонструє циклічне перемикання з контролем кількості виконаних операцій.

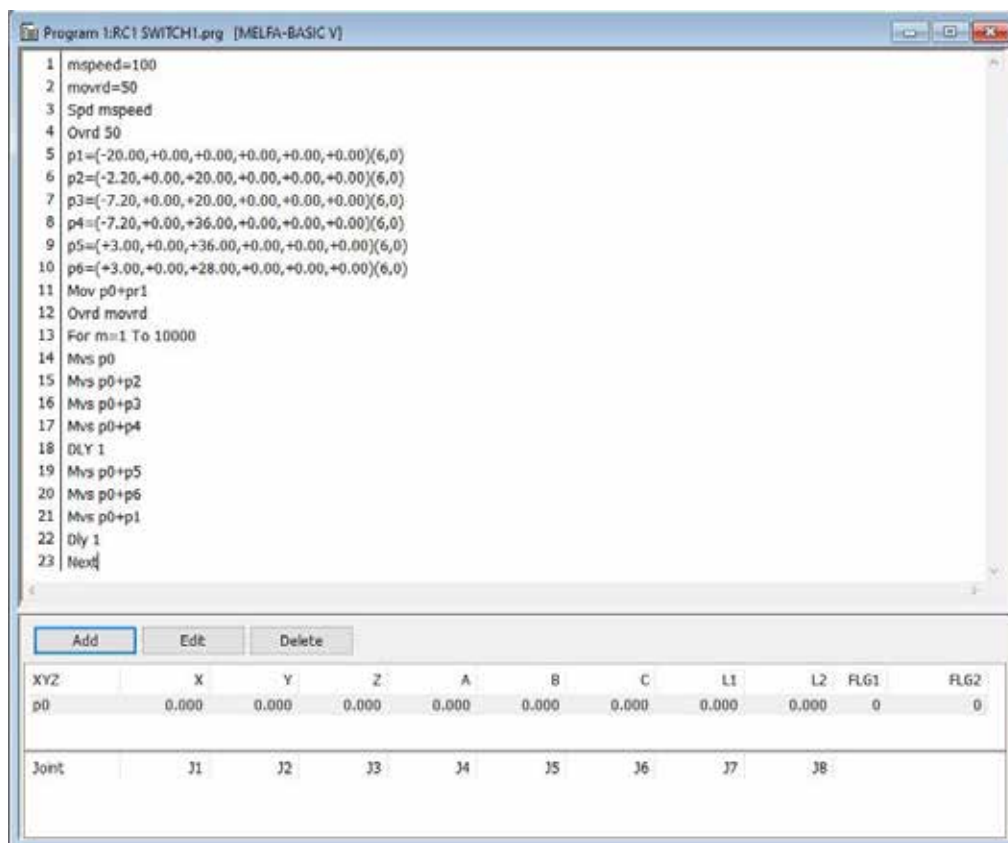


Рис. 3. Приклад фрагмента програми у форматі MELFA BASIC для випробування автоматичного вимикача

Програма забезпечує переміщення робота між позиціями «Вимкнено» та «Увімкнено», виконання дій перемикання з заданими затримками для стабілізації, підрахунок виконаних циклів та автоматичне завершення після досягнення заданої кількості повторень.

Роботизована підсистема забезпечує: повторюваність і відтворюваність механічних дій з відхиленням параметрів менше 2%; контроль прикладених навантажень через інтегровані датчики сили та моменту з точністю 0.1 Н; детерміновану синхронізацію з візуальною діагностикою через цифрові тригери; можливість масштабування тестових сценаріїв під різні типи виробів шляхом зміни координат точок та параметрів дій; безперервну роботу протягом тривалого часу без втоми, характерної для ручної праці, що особливо важливо для випробувань з кількістю циклів 5000-20000.

Для виявлення візуальних дефектів та контролю змін зовнішнього вигляду виробів під час випробувань у склад комплексу інтегровано підсистему комп'ютерного зору [3]. Структура підсистеми комп'ютерного зору охоплює такі компоненти:

1. Система освітлення: використовується світлодіодне освітлення з регульованою інтенсивністю (1000–5000 лк) та спектральними характеристиками (5500–6500 K), що гарантує стабільність результатів при повторних вимірах. Джерело світла має спектр, максимально наближений до природного денного (CRI > 90), що забезпечує точну передачу кольорів і дає змогу фіксувати зміни відтінків.

2. Оптична система: використовується об'єктив із фіксованою фокусною відстанню (16–35 мм), що забезпечує стабільну якість зображення. Важливим є рівень корекції аберацій – сферичної, коматичної, астигматизму, кривизни поля та хроматичної. Сучасні промислові об'єктиви мають високий ступінь компенсації цих спотворень, що гарантує рівномірну чіткість по всій площі кадру.

3. Камера та сенсор: застосовується промислова високороздільна CMOS-камера з роздільною здатністю 5 Мп (2448×2048 пікселів) та апаратною синхронізацією кадрів із роботизованою підсистемою. Камера здійснює захоплення кадрів у момент стабілізації позиції робота (затримка 50–100 мс), що виключає розмиття.

4. Модуль обробки зображень: кожне зображення маркується метаданими (номер циклу, часова мітка, параметри освітлення, координати робота, температура об'єкта) та передається на рівень аналізу. Попередня обробка включає адаптивне вирівнювання гістограми, корекцію освітлення (top-hat transform), фільтрацію шумів

(білінійний або медіанний фільтр), сегментацію (Otsu, watershed) та виділення областей інтересу (ROI) для оптимізації обчислень.

Для виявлення дефектів застосовуються методи машинного навчання та комп'ютерного зору. Сучасні нейромережеві методи, зокрема згорткові нейронні мережі (CNN), дозволяють автоматично навчатися ознакам дефектів без ручного проектування [7]. Навчання здійснюється на наборах із 5000–10000 зображень, що забезпечує точність класифікації на рівні 95–98%. Архітектура може базуватися на ResNet-50, VGG-16 або MobileNet-V2, адаптованих до специфіки побутової техніки.

Типи дефектів, що виявляються підсистемою комп'ютерного зору:

- Тріщини та механічні пошкодження корпусу (мінімальна ширина тріщини, що детектується, – 0.1 мм);
- Деформації поверхонь (відхилення від площини більше 0.5 мм на відстані 10 мм);
- Знебарвлення та зміна кольору внаслідок температурного впливу (зміна відтінку більше 5 одиниць ΔE

в колірному просторі Lab);

- Зношування рухомих частин (зменшення товщини елементів більше 0.2 мм);
- Забруднення та накопичення продуктів зношування;
- Порушення цілісності декоративних покриттів (відшарування, подряпини);
- Зміна геометричних розмірів деталей внаслідок деформації.

У зворотному напрямку модель комп'ютерного зору повертає рішення про стан деталі з трьома рівнями класифікації: «нормальний стан» (confidence > 90%), «попередження про можливий дефект» (confidence 70-90%, потребує уваги), «критичний дефект» (confidence > 90%, випробування слід зупинити) та рекомендації щодо подальших дій (продовжити випробування, провести додаткову діагностику іншими методами, зупинити тест для ручного огляду експертом) [3]. Кожне рішення супроводжується візуалізацією – виділенням на зображенні області, що містить дефект, та зазначенням типу дефекту.

Ключовою особливістю розробленого комплексу є тісна інтеграція роботизованої підсистеми з системою комп'ютерного зору, що створює синергетичний ефект та забезпечує якісно новий рівень автоматизації ресурсних випробувань.

Роботизована система та камера працюють у скоординованому режимі через протокол промислового зв'язку Ethernet/IP: після виконання кожного N-го циклу операцій (типово N=100 для швидких випробувань або N=10 для детального моніторингу) робот переміщує об'єкт у зону огляду камери в стандартизованій позиції з точністю ± 0.1 мм, система освітлення активується за 50 мс до зйомки для стабілізації, здійснюється захоплення кадру з часом експозиції 1-5 мс, освітлення вимикається, робот повертає об'єкт до робочої позиції. Така синхронізація забезпечує стабільність умов спостереження та дозволяє виявляти навіть незначні зміни стану виробу (від 0.1 мм для геометричних дефектів).

Інтеграція дає змогу встановлювати кореляції між функціональною деградацією параметрів (зростання зусилля перемикачів на 10-30% протягом перших 1000 циклів, зміна електричних характеристик – збільшення перехідного опору контактів на 5-15 МОм, поява аномальних звуків з амплітудою вище порогового значення) та візуальними ознаками зношування. Наприклад, збільшення зусилля натискання кнопки може корелювати з появою тріщин у пластиковому механізмі розміром 0.2-0.5 мм, що фіксується камерою. Знебарвлення контактних поверхонь (зміна кольору на 10-20 одиниць ΔE) корелює зі збільшенням перехідного опору. Такий аналіз дозволяє глибше зрозуміти механізми відмов та оптимізувати конструкцію виробів за принципом зворотного зв'язку.

Така інтеграція робототехнічних засобів і методів комп'ютерного зору забезпечує низку практичних переваг:

1. Підвищення об'єктивності оцінки завдяки алгоритмічним критеріям виявлення дефектів замість суб'єктивної візуальної оцінки оператором. Автоматизована система не схильна до втоми, неухильності чи індивідуальних відмінностей у сприйнятті. Міжоператорська варіативність оцінки зменшується з 20-30% до 2-5%.

2. Прискорення циклів тестування за рахунок одночасного збору сенсорних і візуальних даних без необхідності зупиняти випробування для ручного огляду. Безперервна робота роботизованого комплексу дозволяє скоротити календарний час випробувань у 3-5 разів. Один роботизований комплекс може замінити роботу 2-3 операторів у багатозмінному режимі, що знижує трудовитрати на 40-60%.

3. Можливість кореляції функціональної деградації з візуальними ознаками пошкоджень для глибшого аналізу причин і механізмів виходу з ладу. Така інформація є цінною для інженерів-конструкторів при оптимізації дизайну виробів та дозволяє скоротити час розробки нових моделей на 15-25%.

4. Отримання комплексних звітів, які поєднують функціональні параметри та візуальні індикатори деградації виробів. Така документація повністю відповідає вимогам систем менеджменту якості ISO 9001 та забезпечує повну простежуваність результатів випробувань.

Висновки

Таким чином, запропонований роботизований випробувальний комплекс на базі шестиосьового маніпулятора Mitsubishi RV-2AJ з інтегрованою системою комп'ютерного зору забезпечує високу повторюваність механічних дій, контроль прикладених навантажень та синхронізацію з візуальною діагностикою підсистемою

комп'ютерного зору на базі промислової камери з CMOS-сенсором та нейромережових алгоритмів обробки, що забезпечує автоматизоване виявлення дефектів. Практичні переваги запропонованого підходу включають підвищення об'єктивності контролю, зменшення трудовитрат, прискорення циклів тестування та отримання комплексних звітів. Розроблений комплекс може бути впроваджений у виробничих лабораторіях підприємств побутової техніки, центрах сертифікації продукції, а також у навчальних закладах для підготовки фахівців з автоматизації та робототехніки. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення номенклатури об'єктів випробувань, розробку спеціалізованих нейромережових архітектур для різних типів дефектів, а також на створення цифрових двійників виробів для прогнозного моделювання надійності.

Список використаної літератури

1. ДСТУ 3021-95. Випробування і контроль якості продукції. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1995. 51 с. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_3021_95/5-1-0-1619 (дата звернення: 17.11.2025).
2. Mitsubishi Electric Corporation. RV-1A/2AJ Series Robot Arm Setup & Maintenance : Instruction Manual BFP-A8052-E. 2009. 382 p. URL: <https://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/manual/robot/bfp-a8052/bfp-a8052e.pdf> (дата звернення: 17.11.2025).
3. Machine Vision Systems: Types, Functions and Applications. IQSDirectory. URL: <https://www.iqsdirectory.com/articles/machine-vision-system.html> (дата звернення: 17.11.2025).
4. IEC 60335-1:2020. Household and similar electrical appliances – Safety – Part 1: General requirements. International Electrotechnical Commission, 2020.
5. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. New York : Crown Business, 2017. 192 p.
6. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Cambridge : MIT Press, 2016. 775 p.
7. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000. Vol. 22, No. 11. P. 1330–1334. DOI: 10.1109/34.888718

References

1. Derzhavnyi standart Ukrainy (DSTU) 3021-95. (1995). Vyprobuvannia i kontrol yakosti produktsii. Terminy ta vyznachennia [Testing and quality control of products. Terms and definitions]. Retrieved November 17, 2025, from https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_3021_95/5-1-0-1619
2. Mitsubishi Electric Corporation. (2009). RV-1A/2AJ Series Robot Arm Setup & Maintenance: Instruction Manual BFP-A8052-E. Retrieved from <https://dl.mitsubishielectric.com/dl/fa/document/manual/robot/bfp-a8052/bfp-a8052e.pdf>
3. Machine Vision Systems: Types, Functions and Applications. (n.d.). IQSDirectory. Retrieved from <https://www.iqsdirectory.com/articles/machine-vision-system.html>
4. IEC 60335-1:2020. (2020). Household and similar electrical appliances – Safety – Part 1: General requirements. International Electrotechnical Commission.
5. Schwab, K. (2017). The Fourth Industrial Revolution. New York: Crown Business.
6. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep Learning. Cambridge: MIT Press.
7. Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11), 1330–1334. <https://doi.org/10.1109/34.888718>

Дата першого надходження рукопису до видання: 18.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

Є. М. ЛЕБІДЬ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри логістики та проєктного менеджменту
Національний транспортний університет
ORCID: 0000-0003-1794-8060

І. Г. ЛЕБІДЬ

кандидат технічних наук, професор,
професор кафедри міжнародних перевезень та митного контролю
Національний транспортний університет
ORCID: 0000-0003-0707-4179

О. О. МАЗУРЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри «Транспортні вузли»
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0000-0001-5591-1790

Н. О. ЛУЖАНСЬКА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри міжнародних перевезень та митного контролю
Національний транспортний університет
ORCID: 0000-0002-1271-8728

ОПТИМІЗАЦІЯ ДІЯЛЬНОСТІ СКЛАДСЬКОГО ПІДПРИЄМСТВА ПРИ НАДАННІ ПОСЛУГ ЗАМОВНИКАМ

У даній роботі здійснено аналіз організації діяльності складського підприємства в процесі обслуговування замовників. Актуальність досліджуваної проблеми зумовлена необхідністю формування обґрунтованих рекомендацій щодо планування штатної чисельності персоналу з урахуванням тривалості надання складських послуг. Для досягнення поставленої мети застосовано імітаційну модель функціонування складського підприємства під час обслуговування замовників, реалізовану в системі автоматизації імітаційного моделювання GPSS World. Модель дає змогу визначити тривалість складського обслуговування та оцінити потребу в персоналі відповідно до основних напрямів діяльності підприємства.

У процесі моделювання враховано тривалість виконання окремих операцій на кожному етапі складського обслуговування, що забезпечуються працівниками під час обробки зовнішньоторговельних вантажів. Крім того, до моделі включено параметри імовірності виникнення помилок і затримок у процесі надання послуг, а також середню тривалість простоїв, пов'язаних з усуненням допущених недоліків. Це дає можливість оцінити додаткову зайнятість персоналу, зумовлену коригуванням помилок за всіма видами операцій.

Практичне використання запропонованої імітаційної моделі забезпечує можливість підвищення ефективності організації та планування діяльності складських підприємств при взаємодії з замовниками. Застосування моделі також дозволяє визначати тривалість надання складських послуг у процесі виконання зовнішньоторговельних операцій з урахуванням показників ефективності професійної діяльності персоналу підприємства.

Отримані результати моделювання роботи складського підприємства дають змогу визначити необхідну чисельність персоналу, рівень завантаженості працівників, імовірність відмови в обслуговуванні, а також оцінити пропускну спроможність відповідного об'єкта інфраструктури. Крім того, результати моделювання дозволяють порівнювати дві альтернативні стратегії роботи складу: з урахуванням виникнення помилок у процесі обслуговування та за умови їх відсутності. Дана імітаційна модель забезпечує можливість визначення оптимальної кількості працівників за функціональними напрямками діяльності відповідно до рівня попиту на складські послуги з боку замовників. Перевагою проведеного дослідження є можливість практичного застосування отриманих результатів для підтримки управлінських рішень щодо планування діяльності складського підприємства з урахуванням наявного кадрового потенціалу та матеріально-технічної бази, що забезпечують виконання різних операцій. Аналіз отриманих характеристик роботи складського підприємства в умовах здій-

снення зовнішньоторговельних операцій свідчить про істотні відмінності у тривалості виконання окремих етапів обслуговування залежно від наявності помилок у процесі роботи.

Ключові слова: складське підприємство, оптимізація, імітаційна модель, управління персоналом, міжнародне перевезення, товар.

IE. M. LEBID

PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Logistics and Project Management
National Transport University
ORCID: 0000-0003-1794-8060

I. G. LEBID

PhD, Professor,
Professor at the Department of International Transportation
and Customs Control
National Transport University
ORCID: 0000-0003-0707-4179

O. O. MAZURENKO

PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Units
Ukrainian State University of Science and Technologies
ORCID: 0000-0001-5591-1790

N. O. LUZHANSKA

PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of International Transportation
and Customs Control
National Transport University
ORCID: 0000-0002-1271-8728

OPTIMIZATION OF WAREHOUSE ENTERPRISE OPERATIONS IN PROVIDING SERVICES TO CUSTOMERS

The article analyzes the organization of a warehouse enterprise's operations in the process of customer service. The relevance of the study is determined by the need to develop well-founded recommendations for planning the number of staff, considering the duration of warehouse service provision. To achieve this goal, a simulation model of the warehouse enterprise's functioning during customer service was applied, implemented using the GPSS World simulation automation system. The model allows for the determination of warehouse service duration and the assessment of personnel requirements considering according to the main operational areas of the enterprise.

The modeling process considers the duration of individual operations at each stage of warehouse service performed by employees during the handling of foreign trade cargo. In addition, the model includes parameters for the probability of errors and delays in the service provision process, as well as the average duration of downtime associated with correcting identified deficiencies. This makes it possible to estimate the additional personnel workload resulting from error correction across all types of operations.

The practical application of the proposed simulation model provides an opportunity to improve the efficiency of the organization and planning of operations of warehouse enterprises in interacting with customers. The use of the model also allows for determining the duration of warehouse services during foreign trade operations, considering the performance indicators of the enterprise's personnel.

The results of modeling the operation of a warehouse enterprise make it possible to determine the required number of personnel, the level of employee workload, the probability of service failure, and to assess the throughput capacity of the relevant infrastructure facility. In addition, the simulation results allow for comparing two alternative warehouse operation strategies: one that considers errors in the service process and one that does not. This simulation model makes it possible to determine the optimal number of employees by functional areas of activity in accordance with the level of demand for warehouse services from customers. An advantage of the study is the practical applicability of the obtained results to support management decisions on planning the activities of a warehouse enterprise, considering the available human resources and material and technical base that ensures the performance of various operations. Analysis of the obtained characteristics of the warehouse enterprise's operations in the context of foreign trade indicates significant differences in the duration of individual service stages depending on the presence of errors in the workflow.

Key words: warehouse enterprise, optimization, simulation model, personnel management, international transportation, cargo.

Постановка проблеми

Якість складських послуг істотно впливає на ефективність виконання зовнішньоторговельних операцій, оскільки процеси підготовки вантажу до транспортування – пакування, маркування, комплектація та формування вантажних місць забезпечують збереження товарів під час перевезення. Одним із ключових показників ефективності складського обслуговування є тривалість виконання операцій, яка формує значну частку загального часу доставки товару та впливає на терміни логістичного обслуговування.

Використання сучасних підходів до організації роботи складу з урахуванням його внутрішнього потенціалу та потреб клієнтів є доцільним, адже матеріально-технічні ресурси та кваліфікований персонал формують основу конкурентних переваг. Водночас саме грамотне поєднання кількісних і якісних характеристик цих ресурсів з ефективними методами управління дає змогу надавати складські послуги на рівні, що значно перевищує пропозиції інших учасників ринку.

Функціонування складського підприємства як елемента інфраструктури потребує значних капітальних вкладень у будівництво, оснащення та подальшу експлуатацію, що робить важливим залучення великої кількості клієнтів для скорочення строків окупності. Швидкість руху товарів і тривалість виконання складських операцій є визначальними факторами, які впливають на рішення замовників щодо продовження співпраці або відмови від послуг у разі появи затримок.

Тривалість виконання складських операцій значною мірою залежить від кількості та кваліфікації адміністративно-управлінського й технічного персоналу, їхніх професійних навичок та здатності підтримувати стабільну якість і надійність послуг. Практичний досвід показує, що значна частина затримок виникає через помилки працівників і додатковий час, необхідний для їх виправлення. Це зумовлює необхідність впровадження програмних комплексів, які дозволяють керівництву оцінювати ефективність обслуговування клієнтів та здійснювати стратегічне планування діяльності.

Наукові дослідження, спрямовані на удосконалення організації та планування роботи складських підприємств, мають важливе значення для формування їх конкурентоспроможності та підвищення якості обслуговування. Досягнення високих результатів можливе шляхом оптимізації внутрішніх виробничих процесів та налагодження ефективної взаємодії з замовниками на засадах клієнтоорієнтованого підходу.

Практична реалізація таких заходів забезпечить планування діяльності складського підприємства з урахуванням персоналізації сервісу, прозорості процесів, підвищення швидкості та якості обслуговування. Крім того, це створить можливість визначати оптимальну чисельність персоналу за напрямками діяльності, оцінювати імовірність відмови в обслуговуванні та пропускну спроможність інфраструктурного об'єкта.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботі [1, с. 6] розглянуто питання оптимізації складської діяльності підприємства на засадах логістики з метою підвищення ефективності функціонування складу та прибутковості підприємства загалом. Запропоновано певні логістичні рішення, які слід впровадити підприємству в свою складську діяльність задля усунення наявних проблем та підвищення показників ефективності діяльності складу. Але дана робота не дає можливості досліджувати роботу складу з точки зору технологічного процесу обробки заявок та оптимізації персоналу.

В роботі [2, с. 14] розглядається роль логістичної діяльності в сучасних умовах та сформовано пропозиції щодо підвищення ефективності складської логістики відповідно до сучасних вимог ведення бізнесу. Запропоновано впровадження готового програмного забезпечення LMS для процесу управління, або використання аутсорсингу та залучення зовнішньої логістичної компанії. Такий підхід неможливо застосувати для планування та оптимізації роботи менеджерів, які виконують операції з документального оформлення вантажів.

В роботі [3, с. 1107] побудовано імітаційну модель (ІМ) управління логістичними процесами за допомогою програмного інструментарію AnyLogic 8.0. За допомогою імітаційної моделі процесу логістичної діяльності складу вдалося проаналізувати вузькі місця в процесі товарного руху та розробити напрями оптимізації процесу. Робота персоналу в даній ІМ показана лише як складова процесу обробки самого вантажу і не дозволяє досліджувати вплив людського фактору на тривалість виконання операцій з оформлення вантажів різних категорій.

В роботі [4, с. 642] представлено новий підхід, що поєднує аналіз часових рядів з навчанням з підкріпленням для підвищення точності прогнозування попиту та оптимізації роботи складу. Пропонується модель, яка дає змогу оптимізувати політику управління запасами з урахуванням частоти замовлень, термінів їх виконання та обмежень щодо зберігання. Водночас цей підхід не враховує особливості роботи складу на рівні обробки кожної окремої заявки і не може бути застосований для аналізу впливу можливих помилок чи затримок на тривалість надання складських послуг.

У роботі [5] використано дискретно-подієве моделювання для аналізу роботи складу, зокрема процесів розвантаження. Імітаційна модель ґрунтується на реальних даних підприємства та дозволяє оцінювати ефективність на основі показників завантаження ресурсів, використання потужностей та вартості простою. При цьому основну увагу наведено на вплив часу обслуговування, місткості зон і організації черг на пропускну спроможність. Водночас такий підхід не передбачає дослідження впливу помилок і затримок у процесі надання складських послуг на загальний час опрацювання заявок.

У роботі [6, с. 15] запропоновано модель робочого процесу складу, що поєднує методологію управління, побудовану на відстеженні станів диспетчерів та обладнання, різних типів завдань та поведінкових особливостей диспетчерів. Робоча модель виступає концептуальною абстракцією паралельної системи планування, тоді як інтегрована методологія відтворює повний цикл прийняття рішень для запобігання блокуванням під час виконання операцій. Разом із тим цей підхід детально описує внутрішні процеси управління, але не враховує вплив затримок у виконанні заявок і не дає змоги визначити оптимальну чисельність персоналу для стабільної роботи складу.

У роботі [7] пропонується застосовувати дворівневий підхід, що поєднує аналіз часових рядів для прогнозування попиту з методами підкріплювального навчання. Така комбінація дає змогу оптимізувати стратегії управління запасами й розподілу ресурсів у комплексних виробничо-складських системах. Попри цінність цього підходу для прогнозування та планування запасів, він не охоплює деталізацію внутрішніх процесів обробки заявок, які відбуваються всередині складу.

Актуальність дослідження визначається зростаючою потребою у підвищенні результативності роботи складських підприємств, зокрема під час підтримки зовнішньоторговельних операцій. Імітаційне моделювання дає змогу врахувати не лише тривалість виконання окремих операцій, а й вплив можливих помилок і затримок на загальний час обслуговування клієнтів. Це створює передумови для більш обґрунтованого планування ресурсів і чисельності персоналу, що підсилює надійність та конкурентоспроможність логістичних процесів.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є оптимізація діяльності складського підприємства за рахунок застосування імітаційної моделі його функціонування. Реалізація такого підходу забезпечить можливість: формувати рекомендації для керівництва складських підприємств щодо підвищення ефективності обслуговування замовників; здійснювати планування тривалості виконання складських операцій з урахуванням можливих помилок та затримок на кожній стадії процесу; визначати необхідну штатну чисельність персоналу для забезпечення якісного виконання логістичних послуг.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для дослідження роботи складського підприємства та можливості визначення оптимальної кількості менеджерів при обслуговуванні замовників було використано розроблену авторами ІМ, опис якої наведено в роботі [8]. З метою визначення показників ефективності роботи складського підприємства, які потребують оптимізації, доцільним є дослідження видів робіт, що виконуються профільним фахівцем на кожному етапі обслуговування. Кількісний та якісний склад штату підприємства має суттєвий вплив на тривалість виконання робіт, які можуть виконуватися як без помилок так і за їх наявності. В залежності від кількості заявок, що надходять на складське обслуговування, буде виникати потреба у плануванні кадрового забезпечення підприємства з метою мінімізації черг та скорочення часу надання послуг за окремими видами робіт. В таблиці 1 наведено перелік етапів та видів робіт, які виконуються фахівцями підприємства.

Імітаційна модель, яка розроблена авторами в роботі [8], відтворює етапи обслуговування замовників, що характеризуються рядом чинників, таких як: кількість менеджерів, залучених до обслуговування окремого потоку заявок (n_k); тривалість виконання окремого етапу обслуговування ($m_{ij} \pm \sigma_{ij}$, хв.); середній час затримки при виникненні помилок ($\mu_{ij} \pm \varepsilon_{ij}$, хв). Розглядаються умови роботи складського підприємства, що передбачає імовірність виникнення помилок (γ_{ij}) та затримок (λ_{ij}) на кожному етапі обслуговування.

В процесі моделювання визначаються наступні характеристики роботи складу: тривалість складського обслуговування (t_j , хв.); тривалість очікування у черзі на складське обслуговування (w_k , хв.); довжина черги на складське обслуговування (η_k , зам.); частка заявок, що обслужені без простою в черзі (v_k %); коефіцієнт завантаження менеджерів (ψ_k); середнє число зайнятих менеджерів (ρ_k); імовірність відмови в обслуговуванні (q_k); пропускна спроможність (A , зам / міс).

Показники ефективності при моделюванні роботи складського підприємства відображаються наступними даними результатів дослідження: оптимальна кількість менеджерів для складського обслуговування (n_k^*); скорочення тривалості складського обслуговування (Δt_j , %); збільшення пропускної спроможності (ΔA , %); скорочення імовірності відмови в обслуговуванні (Δq %).

Для моделювання процесу надання складських послуг при організації міжнародних перевезень вантажів, з урахуванням часових характеристик роботи фахівців складського підприємства на досліджуваних етапах обслуговування, було використано теорію масового обслуговування.

Результати моделювання організації складського обслуговування за наявності помилок у роботі фахівців складського підприємства та без помилок на усіх етапах наведено у таблиці 2.

За результатами дослідження можна зробити висновок, що за умови допущення помилок у обслуговуванні тривалість складського обслуговування може збільшитися на 69,3 хв. Після розширення штатної чисельності операторів та адміністраторів дана величина зменшується до 50,7 хв.

Таблиця 1

Види робіт при організації складського обслуговування замовників

№ етапу	Назва етапу	Найменування роботи	Виконавець
1	Прийом товару	Приймання заявки на розміщення товару на складі (від клієнта або логістичного відділу)	Адміністратор
		Перевірка документів на товар (накладна, рахунок, сертифікати)	Адміністратор
		Огляд товару на відповідність документам (кількість, упаковка, якість)	Оператор
		Прийом товару на склад (реєстрація в обліковій системі)	Оператор
		Визначення місця зберігання товару на складі	Логіст
2	Розміщення товару	Транспортування товару до місця зберігання (з використанням спецтехніки)	Оператор
		Розміщення товару на полицях/місцях зберігання відповідно до системи	Оператор
		Маркування місця зберігання (етикетка, штрихкод)	Оператор
		Оновлення облікової системи з інформацією про розміщення товару	Адміністратор
3	Підготовка до випуску товару	Приймання заявки на видачу товару (від клієнта або логістичного відділу)	Адміністратор
		Перевірка товару на готовність до видачі (упакування, кількість)	Оператор
		Підготовка супровідних документів для видачі товару (накладна, рахунок).	Адміністратор
		Комплектація товару для видачі	Оператор
4	Випуск товару	Завантаження товару в транспортний засіб (за необхідності спецтехніки)	Оператор, водій
		Перевірка документів водія або клієнта на отримання товару	Адміністратор
		Підписання документів на видачу товару (накладна, акт передачі).	Адміністратор
		Оновлення облікової системи після видачі товару.	Адміністратор
5	Аналіз і завершення процесу	Перевірка залишків товару на складі після видачі	Логіст
		Архівація документів про прийом і видачу товару	Адміністратор
		Аналіз ефективності розміщення та випуску товарів	Керівник

Таблиця 2

Результати моделювання середнього часу обслуговування заявки

Етапи обслуговування	Наявність помилок		Без помилок	
	Середнє значення часу обслуговування, хв.	Середнє квадратичне відхилення, хв.	Середнє значення часу обслуговування, хв.	Середнє квадратичне відхилення, хв.
<i>До оптимізації персоналу</i>				
Етап 1, t_1	219,7	45,0	206,8	41,1
Етап 2, t_2	148,0	47,9	131,3	42,3
Етап 1 – Етап 2	367,7	77,3	338,0	64,3
Етап 3, t_3	238,2	77,7	218,1	67,9
Етап 4, t_4	150,4	48,8	139,0	43,1
Етап 3 – Етап 4	388,6	111,3	357,1	94,6
Етап 5, t_5	173,8	46,4	165,9	43,6
Етап 1 – Етап 5	930,2	142,6	860,9	129,1
<i>Після оптимізації персоналу</i>				
Етап 1, t_1	207,4	44,1	195,6	41,6
Етап 2, t_2	112,3	27,9	99,3	24,6
Етап 1 – Етап 2	319,8	60,8	294,9	55,0
Етап 3, t_3	165,6	44,9	153,3	38,4
Етап 4, t_4	112,1	29,5	104,8	26,0
Етап 3 – Етап 4	277,8	63,2	258,2	55,4
Етап 5, t_5	151,4	42,7	145,2	40,4
Етап 1 – Етап 5	748,9	133,1	698,2	115

За даними звітів, отриманими в результаті моделювання роботи складського підприємства при обслуговуванні замовників, визначені основні показники результатів моделювання та розраховано тривалість простою в чергах на обслуговування, які наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Результати моделювання роботи фахівців складського підприємства

Основні показники моделювання	Адміністратор		Оператор		Логіст		Керівник	
	помилки («+» – наявна; «-» – відсутня)							
	+	-	+	-	+	-	+	-
До оптимізації персоналу								
Середній час простою в черзі w_k , хв.	40,0	37,0	13,9	9,5	12	11,6	9,6	8,8
Середня довжина черги, η_k , зам	2,2	2,1	0,7	0,4	0	0,2	0,1	0,1
Частка заявок, обслужених без простою в черзі, v_k %	21,6	22,5	64,3	70,5	60	60,0	76,1	76,9
Тривалість простою у черзі, LT_k	80,0	70,2	8,3	3,8	2	2,3	1,0	0,9
Кількість менеджерів, n_k	2	2	3	3	1	1	1	1
Коефіцієнт завантаження менеджерів, ψ_k	1,0	1,0	0,8	0,8	1	0,6	0,4	0,4
Середнє число зайнятих менеджерів, ρ_k	2,0	2,0	2,4	2,3	1	0,6	0,4	0,4
Імовірність відмови в обслуговуванні, q_k	0,2	0,2	–	–	–	–	–	–
Пропускна спроможність, A , зам / міс	105,6	107,0	–	–	–	–	–	–
Після оптимізації персоналу								
Середній час простою в черзі w_k , хв.	11,5	10,1	6,5	4,4	25	23,7	10,0	9,6
Середня довжина черги, η_k , зам	0,8	0,7	0,3	0,2	1	0,6	0,1	0,1
Частка заявок, обслужених без простою в черзі, v_k %	56,1	59,4	78,9	85,0	39	39,3	72,0	72,3
Тривалість простою у черзі, LT_k	11,5	10,1	6,5	4,4	25	23,7	10,0	9,6
Кількість менеджерів, n_k	3	3	4	4	1	1	1	1
Коефіцієнт завантаження менеджерів, ψ_k	0,8	0,8	0,7	0,7	1	0,8	0,5	0,5
Середнє число зайнятих менеджерів, ρ_k	2,5	2,4	2,9	2,7	1	0,8	0,5	0,5
Імовірність відмови в обслуговуванні, q_k	0,1	0,04	–	–	–	–	–	–
Пропускна спроможність, A , зам / міс	135,3	135,5	–	–	–	–	–	–

На основі отриманих результатів моделювання встановлено, що після оптимізації штату підприємства частка заявок, обслужених адміністраторами без простою в черзі зросла на 34,5% за наявності помилок в обслуговуванні та 36,9% без допущення помилок. Тривалість простою в черзі за наявності помилок зменшилася на 68,5 хв, а без помилок – 60,1 хв. Аналіз отриманих результатів моделювання показує, що «вузьким місцем» у процесі обробки заявок є кількість адміністраторів, збільшення якої дозволить підвищити пропускну спроможність складського підприємства і скоротити час обслуговування замовників.

Результати імітаційного моделювання свідчать про те, що при плануванні кадрового забезпечення складського підприємства у відповідності до наявного потоку замовлень за умови наявності помилок та без помилок в обслуговуванні змінюються наступні показники: тривалість обслуговування та коефіцієнт завантаженості менеджерів зменшуються; середня кількість зайнятих менеджерів, частка заявок, які обслужені без простою в черзі та пропускна спроможність збільшуються; середній час простою в черзі та імовірність відмови у обслуговуванні скорочуються.

Висновки

Застосування імітаційного моделювання дає можливість формувати обґрунтовані рекомендації для конкретного складського підприємства з урахуванням його матеріально-технічних і кадрових ресурсів. На основі результатів моделювання можна виявляти сильні та слабкі сторони діяльності, оцінювати основні показники ефективності обслуговування замовників та здійснювати стратегічне планування.

Результати досліджень показали, що при застосуванні оптимізаційних рішень у вигляді збільшення кількості адміністраторів та операторів, навіть за умови допущення помилок в обслуговуванні, середній час простою в черзі скоротиться на 28,5 хв. При цьому пропускна спроможність складу збільшиться на 30 зам / міс. Відповідно при відсутності помилок у роботі фахівців середній час перебування в черзі скоротиться на 27,1 хв, а пропускна спроможність зросте на 28 зам / міс. Таким чином використання імітаційного моделювання сприятиме оптимізації діяльності складського підприємства та підвищенню його конкурентоспроможності на ринку послуг.

Список використаної літератури

1. Машак Н., Зеленьок В. Оптимізація складської діяльності підприємства на засадах логістики. *Економіка та суспільство*. 2022. № 43. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-43-33> (дата звернення: 26.11.2025).
2. Багорка М., Якубенко Ю. Напрями підвищення ефективності складської логістики. *Сталий розвиток економіки*. 2023. № 1(46). С. 9–14. URL: <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2023-46-1> (дата звернення: 26.11.2025).

3. Simulation modeling of warehouse operations of a transport company / K. Kolesnyk et al. *Computer Design Systems. Theory and Practice*. 2023. Vol. 5, no. 1. P. 8–18. URL: <https://doi.org/10.23939/cds2023.01.008> (date of access: 26.11.2025).
4. Erlangga S. B., Yunita A., Satriana S. R. Development of Automatic Real Time Inventory Monitoring System using RFID Technology in Warehouse. *JOIV : International Journal on Informatics Visualization*. 2022. Vol. 6, no. 3. P. 636. URL: <https://doi.org/10.30630/joiv.6.3.1231> (date of access: 26.11.2025).
5. Kim T. Y. Improving warehouse responsiveness by job priority management: A European distribution centre field study. *Computers & Industrial Engineering*. 2020. Vol. 139. P. 105564. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.011> (date of access: 26.11.2025).
6. Fedorko G., Molnár V., Mikušová N. The Use of a Simulation Model for High-Runner Strategy Implementation in Warehouse Logistics. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, no. 23. P. 9818. URL: <https://doi.org/10.3390/su12239818> (date of access: 26.11.2025).
7. Hosseini M., Madathil S. C., Khasawneh M. T. Reinforcement learning-based simulation optimization for an integrated manufacturing-warehouse system: a two-stage approach. *Expert Systems with Applications*. 2025. P. 128259. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128259> (date of access: 26.11.2025).
8. Construction of a simulation model of the work of a warehouse enterprise as a link in the logistics chain / I. Lebid et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 5, no. 3 (137). P. 36–45. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.341456> (date of access: 27.11.2025).

References

1. Mashchak, N., & Zeleniuk, V. (2022). Warehouse activities optimization of the enterprise on the basis of logistics. *Economy and Society*, (43). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-43-33>.
2. Bahorka, M., & Yakubenko, Y. (2023). DIRECTIONS OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF WAREHOUSE LOGISTICS. *Sustainable Development of Economy*, (1(46), 9-14. <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2023-46-1>.
3. Kolesnyk, K., Khusnutdinov, M., Trochimczuk, R., & Artyshchuk, I. (2023b). Simulation modeling of warehouse operations of a transport company. *Computer Design Systems. Theory and Practice*, 5(1), 8–18. <https://doi.org/10.23939/cds2023.01.008>.
4. Erlangga, S. B., Yunita, A., & Satriana, S. R. (2022b). Development of Automatic Real Time Inventory Monitoring System using RFID Technology in Warehouse. *JOIV : International Journal on Informatics Visualization*, 6(3), 636. <https://doi.org/10.30630/joiv.6.3.1231>.
5. Kim, T. Y. (2020). Improving warehouse responsiveness by job priority management: A European distribution centre field study. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 105564. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.011>.
6. Fedorko, G., Molnár, V., & Mikušová, N. (2020). The Use of a Simulation Model for High-Runner Strategy Implementation in Warehouse Logistics. *Sustainability*, 12(23), 9818. <https://doi.org/10.3390/su12239818>.
7. Hosseini, M., Madathil, S. C., & Khasawneh, M. T. (2025). Reinforcement learning-based simulation optimization for an integrated manufacturing-warehouse system: a two-stage approach. *Expert Systems with Applications*, 128259. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128259>.
8. Lebid, Ie., Luzhanska, N., Lebid, I., Mazurenko, A., Mykhailenko, I., & Sharai, S. (2025). Construction of a simulation model of the work of a warehouse enterprise as a link in the logistics chain. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(3 (137)), 36–45. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.341456>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 19.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

О. Л. МАТВЄЄВА

кандидат технічних наук, доцент,
професор кафедри хімії і хімічної технології
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0001-7450-0479

А. Д. КУСТОВСЬКА

кандидат хімічних наук, доцент,
завідувачка кафедри хімії і хімічної технології
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0002-6836-3305

І. Л. ТРОФІМОВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри хімії і хімічної технології
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0001-5539-1166

В. В. ЄФИМЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри загальної, органічної та фізичної хімії
Національний університет біоресурсів і природокористування України
ORCID: 0000-0001-4903-6173

М. Р. МАКСИМЮК

кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри хімії і хімічної технології
Державний університет «Київський авіаційний інститут»
ORCID: 0000-0002-6953-8437

СУЧАСНІ НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ПІДХОДИ ДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЧИСТОТИ ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕНЬ У ФАРМАЦЕВТИЧНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

У статті розглянуто сучасні науково-технічні підходи до забезпечення чистоти виробничих приміщень у фармацевтичній промисловості. В роботі проведено узагальнення нормативно-правової бази та аналіз традиційних і новітніх технологій контролю чистоти, дана оцінка інноваційних рішень (автоматизація, цифровізація, роботизація), а також визначені практичні напрями удосконалення систем управління чистими приміщеннями. Мета дослідження – аналіз сучасних підходів до забезпечення чистоти виробничих приміщень у фармацевтичній промисловості відповідно до вимог GMP та ISO. Проаналізовано нормативні вимоги (GMP, ISO) та міжнародні стандарти щодо організації чистих приміщень. Узагальнено традиційні та інноваційні методи контролю забруднень, як то системи вентиляції та фільтрації повітря, технології дезінфекції, моніторинг мікробіологічних і механічних часток. Наведена критерій-порівняльна оцінка традиційних і сучасних рішень у забезпеченні чистоти виробничих приміщень із урахуванням ролі персоналу, фільтраційного обладнання, моніторингу забруднення, відповідності діючим стандартам. Проаналізовано ефективність систем фільтрації, як ключового чинника забезпечення чистоти у фармацевтичних виробничих приміщеннях, зокрема HEPA- та ULPA- фільтрів. Надана інтегрована узагальнена оцінка ефективності впровадження сучасних рішень у фармацевтичних підприємствах, яка висвітлює пріоритетність новітніх технологій (ULPA, АТР-тести, IoT) при забезпеченні чистоти виробничих приміщень за рахунок суттєвого підвищення швидкості, чутливості та надійності контролю у чистих приміщеннях. Показано, що сучасні науково-технічні підходи – від багаторівневої фільтрації та дезінфекції до цифрових систем моніторингу й автоматизації значно підвищують ефективність контролю та мінімізують ризики. Подальший розвиток у цій сфері пов'язаний із впровадженням роботизованих технологій, розширенням використання IoT-рішень і гармонізацією національних стандартів з міжнародними вимогами GMP та ISO.

Ключові слова: чисті приміщення, фармацевтична промисловість, контроль забруднень, фільтрація повітря, дезінфекція, моніторинг, автоматизація.

O. L. MATVYEYeva

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Chemistry and Chemical Technology
State University "Kyiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0001-7450-0479

A. D. KUSTOVSKA

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Chemistry and Chemical Technology
State University "Kyiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0002-6836-3305

I. L. TROFIMOV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Chemistry and Chemical Technology
State University "Kyiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0001-5539-1166

V. V. YEFYMENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of General, Organic and Physical Chemistry
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0002-4903-6173

M. R. MAKSYMUK

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Chemistry and Chemical Technology
State University "Kyiv Aviation Institute"
ORCID: 0000-0002-6953-8437

MODERN SCIENTIFIC AND TECHNICAL APPROACHES TO PROVIDING CLEANLINESS OF PRODUCTION PREMISES IN THE PHARMACEUTICAL INDUSTRY

The article considers modern scientific and technical approaches to ensuring the cleanliness of production facilities in the pharmaceutical industry. The work summarizes the regulatory framework and analyzes traditional and modern technologies for controlling cleanliness, evaluates innovative solutions (automation, digitalization, robotics), and identifies practical areas for improving cleanroom management systems. The purpose of the study is to analyze modern approaches to ensuring the cleanliness of production facilities in the pharmaceutical industry in accordance with GMP and ISO requirements. The regulatory requirements (GMP, ISO) and international standards for organizing cleanrooms are analyzed. Traditional and innovative methods of pollution control are summarized, such as ventilation and air filtration systems, disinfection technologies, monitoring of microbiological and mechanical particles. A criterion-comparative assessment of traditional and modern solutions for ensuring the cleanliness of production facilities is given, taking into account the role of personnel, filtration equipment, pollution monitoring, and compliance with current standards. The effectiveness of filtration systems as a key factor in ensuring cleanliness in pharmaceutical production facilities, in particular HEPA and ULPA filters, is analyzed. An integrated generalized assessment of the effectiveness of the implementation of modern solutions in pharmaceutical enterprises is provided, which highlights the priority of the latest technologies (ULPA, ATP tests, IoT) in ensuring the cleanliness of production facilities by significantly increasing the speed, sensitivity and reliability of control in clean rooms. It is shown that modern scientific and technical approaches – from multi-level filtration and disinfection to digital monitoring and automation systems – significantly increase the efficiency of control and minimize risks. Further development in this area is associated with the introduction of robotic technologies, the expansion of the use of IoT solutions and the harmonization of national standards with international GMP and ISO requirements.

Key words: clean rooms, pharmaceutical industry, pollution control, air filtration, disinfection, monitoring, automation.

Постановка проблеми

Забезпечення чистоти виробничих приміщень є одним із ключових чинників якості та безпеки лікарських засобів. Фармацевтичне виробництво характеризується високими вимогами до стерильності середовища, оскільки навіть мінімальне мікробіологічне чи механічне забруднення може призвести до втрати ефективності препарату, виникнення небажаних реакцій у пацієнтів або створення загрози для здоров'я та життя людини.

Світова практика показує, що понад шістьдесяті відсотків відмов у серійних виробництвах лікарських засобів пов'язані саме з невідповідністю чистоти приміщень та контролю контамінаційних ризиків. У свою чергу, такі

регуляторні органи, як ЕМА, FDA, ВООЗ приділяють особливу увагу цим аспектам, що відображається у стандартах GMP та міжнародних нормах ISO 14644.

Крім того, сучасні виклики фармацевтичної промисловості, як глобалізація ринку, швидке впровадження інноваційних технологій, посилення конкуренції та зростання вимог до якості вимагають застосування нових підходів до організації чистих приміщень. Мова йде про цифровізацію процесів моніторингу, автоматизацію систем вентиляції та фільтрації, впровадження роботизованих рішень для мінімізації людського чинника.

Отже, забезпечення чистоти у виробничих приміщеннях фармацевтичної промисловості є не лише регуляторною вимогою, але й стратегічною умовою конкурентоспроможності підприємств та гарантією безпеки кінцевого споживача.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблема чистоти набуває ще більшої актуальності в умовах зростання обсягів виробництва біотехнологічних препаратів, вакцин, радіофармацевтичних засобів та стерильних лікарських форм, для яких навіть незначне відхилення від контрольованих параметрів середовища може мати критичні наслідки.

В міжнародних публікаціях останніх років активно досліджується динаміка змін у чисельності бактерій і грибків упродовж сезонів року в чистих приміщеннях фармацевтичного підприємств [1], визначаються стратегічні напрями контролю забруднень із акцентом на стерильність через належну дезінфекцію [2]. Також заслуговують уваги практичні результати контролю часток і мікробів у фармацевтичних приміщеннях із застосуванням автоматизованих систем моніторингу даних [3].

Дослідження впливу людського чинника на процес забезпечення належного рівня чистоти виробничих приміщень галузі займають особливе місце. Встановлено, що до вісімдесяти відсотків мікроорганізмів у чистих приміщеннях надходить із людського шкіряного мікробіома, переважно це тимчасові та резидентні мікроорганізми, що активно скидаються операторами. Відомо, що людська шкіра – це багате джерело бактерій: понад 1000 видів на шкірі, включно з *Micrococcus*, *Staphylococcus*, *Corynebacterium*, *Bacillus*. Дослідженнями доведено також, що популяція мікробів у повітрі значною мірою залежить від людської активності, досягаючи, 1 000 мільйонів шкірних клітин на добу [4]. Додавання одного оператора може збільшити концентрацію частинок $\geq 0,5$ μm у приміщенні приблизно на 2000 часток/ m^3 . Контамінація може переноситися на технологічні поверхні через операторів, особливо на пошкоджені або шорсткому оформленні обладнання.

Окреме місце приділяється поведінковому аналізу операторів [4, 5]. Показано, що неправильне вдягання спецодягу, швидкі рухи, недотримання гігієни рук можуть спричинити турбуленцію і порушувати контрольовані потоки чистого повітря. Окрім цього, не розуміння працівниками важливості дотримання правил і вимог проведення виробничого процесу знижує рівень ефективності фахового навчання.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є аналіз сучасних підходів до забезпечення чистоти виробничих приміщень у фармацевтичній промисловості відповідно до вимог GMP та ISO. Основними завданнями є узагальнення нормативно-правової бази, аналіз традиційних і новітніх технологій контролю чистоти, оцінка інноваційних рішень (автоматизація, цифровізація, роботизація), а також визначення практичних напрямів удосконалення систем управління чистими приміщеннями.

Викладення основного матеріалу дослідження

Забезпечення чистоти у виробничих приміщеннях фармацевтичної промисловості регламентується комплексом міжнародних і національних нормативно-правових актів, які визначають стандарти організації чистих приміщень та процедури контролю їхнього стану. Ключову роль відіграють правила *Good Manufacturing Practice* (GMP), що встановлюють вимоги до виробничих зон, персоналу, обладнання, систем вентиляції та моніторингу навколишнього середовища. Зазначимо, що особливе значення має Додаток 1 (Annex 1) до GMP ЄС, який детально регламентує класи чистоти приміщень (Grade A–D), порядок їх валідації, моніторинг у станах «*at rest*» та «*in operation*», а також вимоги до стратегій контролю контамінаційних ризиків (Contamination Control Strategy, CCS).

Також важливим міжнародним орієнтиром є стандарти серії ISO 14644, що визначають класифікацію повітря за концентрацією аерозольних частинок, правила випробування та моніторингу чистих приміщень, а також принципи біоконтамінаційного контролю (ISO 14698). Ці стандарти забезпечують універсальну систему порівняння і використовуються як у фармацевтичній, так і в електронній, біотехнологічній та медичній промисловості.

В Україні діють гармонізовані нормативні документи, зокрема Державна фармакопея України, яка містить вимоги щодо виробництва стерильних препаратів та адаптовані стандарти ISO, що інтегруються у національну систему технічного регулювання. Крім того, приєднання України до європейського фармацевтичного ринку обумовлює необхідність приведення виробництва у відповідність до вимог EU GMP та взаємного визнання результатів інспектування.

Таким чином, нормативно-правове регулювання у сфері забезпечення чистоти виробничих приміщень є багаторівневим та інтегрованим: від глобальних стандартів ISO та GMP до національних фармакопейних вимог. Дотримання цих норм гарантує належний рівень якості лікарських засобів і безпеку пацієнтів.

Проведене порівняння вимог ISO (ISO 14644) та GMP (EU GMP Annex 1, FDA cGMP) (табл. 1) щодо чистих приміщень дозволило визначити наступне:

- зрозуміти, як ISO-класи співвідносяться з GMP-класами, наприклад: ISO 14644-1 визначає класи чистоти приміщень за концентрацією частинок у повітрі, в той же час GMP Annex 1 оперує власними «класами А, В, С, D», але для їхнього визначення посилається на стандарти ISO;
- показати відмінності у фокусі стандартів: якщо ISO – це технічний стандарт, що описує методи вимірювання, класифікації та валідації чистих приміщень, то GMP – регуляторний документ, який визначає умови виробництва лікарських засобів, включно з мікробіологічними критеріями, поведінкою персоналу та моніторингом;
- продемонструвати різницю між статичним контролем (ISO) та динамічним забезпеченням якості (GMP), оскільки ISO зосереджений на початковій атестації (під час здачі чистої кімнати в експлуатацію), а GMP націлений на постійний моніторинг (*on-line/at-line*) та враховує мікробіологічні показники, яких ISO не регламентує.

Таблиця 1

Порівняння вимог ISO та GMP щодо чистих приміщень

Критерій	ISO (серія 14644, 14698)	GMP (EU GMP Annex 1)
Мета	Класифікація та контроль чистих приміщень у різних галузях (фармацевтика, електроніка, біотехнологія)	Забезпечення належної якості та стерильності лікарських засобів
Класифікація чистоти	ISO Class 1–9 (за концентрацією аерозольних частинок у повітрі)	Grade A–D (відповідає рівню стерильності у виробництві лікарських засобів)
Фокус контролю	Кількість та розмір частинок у повітрі (0,1–5 мкм)	Контроль мікробіологічного та механічного забруднення; управління ризиками контамінації
Моніторинг	Регулярні випробування та валідація приміщень (ISO 14644-2)	Безперервний або частий моніторинг у станах « <i>at rest</i> » та « <i>in operation</i> »
Біоконтамінація	ISO 14698 – принципи контролю мікроорганізмів, але без жорстких регуляторних норм	Чіткі вимоги до мікробіологічного моніторингу, стратегія контролю контамінаційних ризиків (CCS)
Застосування	Використовується у фармацевтичній, електронній, авіаційній, харчовій промисловості	Виключно для фармацевтичної галузі (виробництво стерильних і нестерильних лікарських форм).

Як видно із наведеного вище матеріалу, ISO стандарти універсальні, тоді як GMP – вузькоспеціалізовані для фармацевтики й мають жорсткіші вимоги до мікробіологічного контролю та управління ризиками.

Відповідність ISO класів чистоти та GMP Grade A–D наведено у табл. 2. Так, ISO визначає чистоту за концентрацією частинок певного розміру в 1 м³ повітря, а GMP встановлює категорії чистоти для різних виробничих процесів із урахуванням ризиків контамінації та режиму роботи («*at rest*»/«*in operation*»).

Таблиця 2

Відповідність ISO класів чистоти та GMP Grade A–D

GMP Grade	Відповідний клас ISO 14644-1	Кількість частинок $\geq 0,5$ мкм / м ³ (<i>at rest</i>)	Типове застосування
Grade A	ISO 5	$\leq 3\,520$	Критичні зони: асептичні операції, наповнення, відкриті ампули та флакони
Grade B	ISO 5 (<i>at rest</i>) / ISO 7 (<i>in operation</i>)	$\leq 3\,520$ (<i>at rest</i>), $\leq 352\,000$ (<i>in operation</i>)	Приміщення з асептичними зонами
Grade C	ISO 7 (<i>at rest</i>) / ISO 8 (<i>in operation</i>)	$\leq 352\,000$ (<i>at rest</i>), $\leq 3\,520\,000$ (<i>in operation</i>)	Підготовка розчинів, наповнення нестерильних препаратів
Grade D	ISO 8 (<i>at rest</i>)	$\leq 3\,520\,000$	Допоміжні операції: зважування сировини, підготовчі етапи

Огляд сучасних підходів щодо організації чистих приміщень. Організація чистих приміщень у фармацевтичній промисловості базується на комплексі заходів, спрямованих на мінімізацію ризиків контамінації лікарських засобів. Відповідно сучасні підходи враховують класифікацію приміщень за GMP (Grade A–D) та ISO 14644, базуються на використанні багаторівневих систем фільтрації повітря, впровадженні зонування і бар'єрних технологій. Зазначимо, що важливе місце займає інтегрований моніторинг параметрів мікробіологічної та механічної чистоти, що забезпечує контроль у режимах «*at rest*» та «*in operation*». Останні тенденції в цій галузі беззаперечно демонструють перехід від традиційних систем до інноваційних рішень, орієнтованих на автоматизацію та цифровий контроль процесів. Розглянемо це більш детально.

Сучасна система забезпечення чистоти у фармацевтичних виробничих приміщеннях базується на комплексі методів та технологій, спрямованих на мінімізацію ризику контамінації. Зазначимо, що до ключових напрямів належать: системи вентиляції та кондиціонування (HVAC); бар'єрні технології; матеріали та покриття; дезінфекція та стерилізація; системи моніторингу та автоматизація та цифровізація процесів.

Використання багаторівневої фільтрації повітря (HEPA, ULPA) дозволяє підтримувати необхідний клас чистоти. Правильна організація повітряних потоків (ламінальний чи турбулентний режим) забезпечує відведення частинок і мікроорганізмів. Застосування ізоляторів та шлюзів мінімізує вплив людського чинника, який є основним джерелом забруднень у «чистих приміщеннях». Для оздоблення приміщень використовують антистатичні, гладкі, стійкі до дезінфекційних засобів поверхні, що запобігають накопиченню частинок і мікробів. Також широко застосовуються методи хімічної дезінфекції (перекис водню, хлорвмісні засоби, спирти), фізичні методи (УФ-опромінення, парова стерилізація). Останні тенденції характерні використанням автоматизованих систем аерозольної дезінфекції. Важливим є також моніторинг параметрів мікроклімату (температура, вологість, тиск), а постійний контроль кількості частинок і мікробіологічних показників у реальному часі здійснюється за допомогою автоматизованих сенсорів та приладів. Слід звернути особливу увагу, що впровадження IoT-сенсорів, систем віддаленого моніторингу, роботизованих комплексів дозволяє мінімізувати вплив людини, підвищити точність контролю та знизити ризик аварійних ситуацій.

Таким чином, сучасні методи забезпечення чистоти поєднують традиційні інженерні рішення з інноваційними технологіями автоматизації та цифрового моніторингу, що відповідає вимогам GMP та міжнародних стандартів ISO.

Порівняння традиційних і сучасних рішень. Забезпечення чистоти виробничих приміщень у фармацевтичній промисловості історично базувалося на традиційних методах, які сьогодні поступово витісняються сучасними технологічними рішеннями. Їхнє порівняння дозволяє оцінити переваги інноваційних підходів та визначити напрями подальшого розвитку (табл. 3). Розглядаючи традиційні методи слід зазначити, що їм притаманне: використання багаторівневої механічної фільтрації без системи динамічного моніторингу; періодичний мікробіологічний контроль із затримкою у часі між відбором проб та отриманням результатів; домінуюча роль персоналу у процесах очищення та дезінфекції; складні й довготривалі процедури очищення поверхонь і обладнання; лімітоване використання автоматизації.

Таблиця 3

Порівняння традиційних і сучасних рішень у забезпеченні чистоти виробничих приміщень

Критерій	Традиційні методи	Сучасні рішення
Фільтрація повітря	Багаторівнева механічна фільтрація	HEPA- та ULPA-фільтрація з контрольованими потоками повітря
Моніторинг	Періодичний контроль, затримка у результатах	Постійний автоматизований моніторинг у реальному часі
Роль персоналу	Значна участь у дезінфекції та контролі	Мінімізація впливу людини завдяки ізоляторам та RABS
Очищення та дезінфекція	Ручні та тривалі процедури	Роботизовані системи, автоматизоване аерозольне чи парове очищення
Технологічний рівень	Обмежене застосування автоматизації	Інтеграція IoT, цифрових сенсорів, віддалений моніторинг
Відповідність стандартам	Часткова відповідність, потреба у доопрацюваннях	Повна відповідність GMP та ISO, гармонізація з міжнародними вимогами

На відміну від цього сучасні рішення демонструють застосування засобів HEPA- та ULPA-фільтрації у поєднанні з контрольованими потоками повітря. Також сюди відносять: постійний автоматизований моніторинг кількості частинок та мікробного навантаження у режимі реального часу; використання ізоляторів, інших бар'єрних систем для мінімізації контакту людини з критичними зонами; роботизовані системи очищення та дезінфекції з використанням аерозольних або парових методів. На наш погляд, заслуговує особливої уваги впровадження «розумної» мережі сенсорів і пристроїв, віддалений моніторинг, яка робить виробниче середовище прозорим у реальному часі, тобто інтеграція цифрових технологій IoT.

Переваги таких інноваційних рішень є безсумнівними, вочевидь сучасні підходи дозволяють підвищити ефективність контролю, зменшити ймовірність людських помилок, скоротити час на проведення критичних процедур та забезпечити відповідність міжнародним стандартам GMP та ISO.

Слід зазначити, що ефективність систем фільтрації (рис. 1) є ключовим чинником забезпечення чистоти у фармацевтичних виробничих приміщеннях. Так, HEPA-фільтри класу H14 здатні затримувати щонайменше 99,995 % частинок розміром $\geq 0,3 \mu\text{m}$, що відповідає вимогам ISO та EN стандартів. У свою чергу, ULPA-фільтри класу U15 демонструють ще вищу ефективність – до 99,9995 % при частинках $\sim 0,12 \mu\text{m}$ [6]. Водночас, практичний досвід експлуатації [7] засвідчує, що підвищений рівень очищення супроводжується значним зниженням повітряного потоку та зростанням енергоспоживання. Це робить HEPA більш економічно виправданим рішенням для більшості фармацевтичних чистих приміщень класів ISO 5–8.

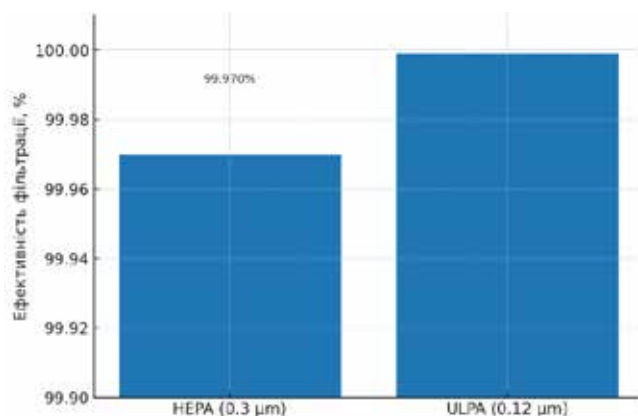


Рис. 1. Ефективність HEPA- та ULPA-фільтрації

Джерело: за даними EN 1822/ISO 29463 та специфікації DOE/HEPA

Однак, ULPA-фільтри потребують приблизно на 60–80 % більше енергії, а також характеризуються більш частотою заміною та ширшим ціновим діапазоном порівняно з HEPA [6; 7]. Це накладає додаткові вимоги на експлуатацію, особливо у великих виробничих комплексах. Таким чином, вибір між HEPA та ULPA базується не лише на вимогах до класу чистоти, але й на балансі «ефективність–економічність».

Методологічні та технічні аспекти. Відомо, що система забезпечення чистоти у виробничих приміщеннях ґрунтується на поєднанні технічних і організаційних заходів. До ключових методологічних принципів належать контроль потоків повітря, правильне зонування приміщень, вибір матеріалів з низькою адгезією контамінантів та регулярна валідація обладнання. Технічна складова передбачає застосування HEPA- та ULPA-фільтрації, сучасних систем вентиляції, дезінфекції поверхонь і автоматизованих приладів для моніторингу частинок та мікроорганізмів. Інноваційні рішення, такі як роботизовані комплекси та інтеграція IoT-сенсорів, забезпечують підвищення точності контролю та зниження впливу людського чинника.

Контроль повітря, поверхонь та обладнання займає провідне місце у організації і забезпеченні заданого рівня чистоти. Основним індикатором стану чистого приміщення є рівень аерозольних частинок та мікробіологічне забруднення. У сучасних лабораторіях застосовують онлайн-системи моніторингу повітря з передачею даних у SCADA/MES. Також використовуються лічильники для вимірювання концентрації частинок $\geq 0,3$ мкм (ISO 14644-1) і аспіраційні пробовідбірники для контролю повітря робочої зони щодо мікробіологічного забруднення.

Сучасні підходи до контролю чистоти поверхонь характеризуються застосуванням таких методів, як використання біолоюмінесцентних систем (АТР-тестування), що дозволяє отримати результат протягом кількох хвилин, а також тампонування (*swab test*), особливо для важкодоступних зон обладнання і відбитків контактними чашками (RODAC plates) для визначення кількості колонієутворюючих одиниць (КУО/см²). Для забезпечення бажаного рівня чистоти обов'язковим є регулярний контроль, що має передбачати постійний моніторинг стану фільтраційних модулів та вентиляційних систем з перевіркою герметичності, використання вбудованих сенсорів та IoT-модулів, які дають змогу відстежувати стан обладнання в режимі реального часу і застосування стерильних тампонів для важкодоступних поверхонь.

Насьогодні особливо важливою складовою забезпечення чистоти є інтеграція отриманих даних шляхом об'єднання результатів контролю повітря, поверхонь та обладнання у єдину систему (LIMS/MES). Це дозволяє створити повну екологічну карту чистого приміщення і сформувані ризик-орієнтовані програми прибирання, дезінфекції та технічного обслуговування.

Слід зазначити, що валідація та калібрування є методологічно завершальною фазою забезпечення чистоти. Відповідно усі системи фільтрації та моніторингу підлягають регулярній перевірці відповідно до ISO 14644, EN 1822 та ін. А використання незалежних калібрувальних аерозольних генераторів (наприклад, DOP-тест для HEPA) є обов'язковою складовою. Послідовність **технологічного ланцюга сучасних підходів щодо забезпечення** чистоти виробничих приміщень у фармацевтичній промисловості наведена на рис. 2. Розглядаючи інноваційні рішення в аспекті автоматизації та цифровізації процесів забезпечення чистоти виробничих приміщень слід звернути увагу, що впровадження таких роботизованих систем, як роботи-маніпулятори, ізолятори з автоматичним завантаженням тощо, безумовно мінімізують людський чинник, що є ключовим джерелом контамінації у фармацевтичних виробництвах. Водночас практика використання Automated Guided Vehicles (AGV) для транспортування матеріалів у чистих зонах знижує ризик перехресного забруднення, а застосування системи HVAC з автоматизованим управлінням дозволяють підтримувати сталі параметри мікроклімату в реальному часі



Рис. 2. Методологічні та технічні аспекти використання систем фільтрації, дезінфекції, моніторингу

Практика діяльності фармацевтичних підприємств ЄС [8] показала, що впровадження системи фільтрації ULPA у виробництві стерильних ін'єкційних препаратів може зменшити кількість частинок $\geq 0,3$ мкм на 40%, мікробіологічних контамінантів – на 25%. Окрім цього, інтеграція автоматизованої системи моніторингу повітря (EMS), дозволяє скоротити час реагування на відхилення з 4–6 год до 15 хв. Впровадження автоматизованого контролю поверхонь та обладнання при виробництві вакцин (США, 2021 р.) шляхом АТР-тестування та застосування біолюмінесцентних сенсорів дозволило перейти на реактивний та превентивний режим дезінфекції замість запланованого, що знизило кількість відхилень GMP на 18%. Порівняно з традиційними методами (RODAC-пластини, 72–96 год) час отримання результатів було скорочено до 30–60 секунд.

У 2023 р. на одному з біотехнологічних підприємств у Німеччині було реалізовано інтегровану систему моніторингу середовища, що поєднує IoT-сенсори (контроль частинок у повітрі, вологості та перепадів тиску), систему керування виробництвом MES для збереження даних у відповідності до вимог GMP Annex 1, а також модулі штучного інтелекту для прогнозування пікових рівнів забруднення. Подібні архітектури належать до концепції **Pharma 4.0**, активно підтримуваної ISPE та іншими професійними організаціями, і вже демонструють ефективність у зниженні ризиків мікробіологічної контамінації та зменшенні часу реакції на відхилення [9, 10].

Інтегрована узагальнена оцінка ефективності впровадження сучасних рішень у фармацевтичних підприємствах, наведена на рис. 3, наглядно демонструє пріоритетність новітніх технологій при забезпеченні чистоти виробничих приміщень.

Таким чином, упровадження інноваційних рішень (ULPA, АТР-тести, IoT) демонструє суттєве підвищення швидкості, чутливості та надійності контролю у чистих приміщеннях. Перехід до цифрового моніторингу знижує залежність від людського чинника та відповідає сучасним вимогам GMP Annex 1 (2022), а найбільш перспективним напрямом є поєднання автоматизації, цифровізації та ризик-орієнтованого підходу до екологічного моніторингу.

Аналіз упровадження сучасних рішень на фармацевтичних підприємствах показує, що інтеграція систем автоматизованого моніторингу та використання бар'єрних технологій дозволяє суттєво знизити ризики контамінації. Практика демонструє економічну доцільність інноваційних технологій завдяки скороченню витрат на повторне тестування та утилізацію бракованих серій. Водночас залишаються проблеми, пов'язані з високою вартістю обладнання та необхідністю підготовки персоналу, що потребує подальшого вивчення та оптимізації процесів.

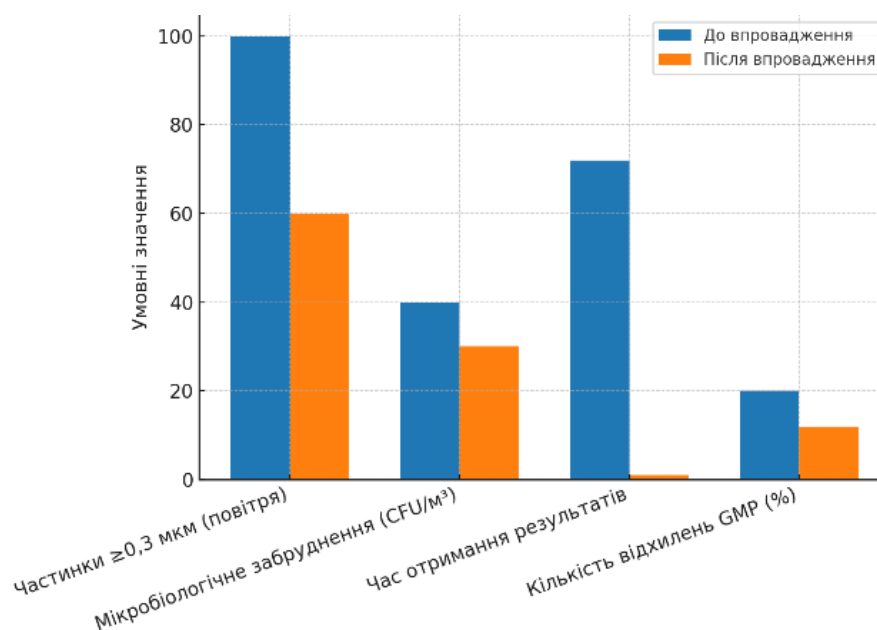


Рис. 3. Ефективність впровадження сучасних рішень у фармацевтичних підприємствах

Висновки

Забезпечення чистоти у виробничих приміщеннях є стратегічною умовою безпеки та якості лікарських засобів. Сучасні науково-технічні підходи – від багаторівневої фільтрації та дезінфекції до цифрових систем моніторингу й автоматизації значно підвищують ефективність контролю та мінімізують ризики. Подальший розвиток у цій сфері пов'язаний із впровадженням роботизованих технологій, розширенням використання IoT-рішень і гармонізацією національних стандартів з міжнародними вимогами GMP та ISO.

Список використаної літератури

1. Eckford C. Seasonal variation of microbial contamination in pharmaceutical cleanrooms. *European Pharmaceutical Review*. 2024. URL : <https://www.europeanpharmaceuticalreview.com/news/226582/seasonal-variation-of-microbial-contamination-in-pharmaceutical-cleanrooms/> (date of access: 16.09.2025).
2. Singer D., Hoal M. Cleanroom Disinfection: Maintaining Sterility by Design. *American Pharmaceutical Review*. 2024. № 27 (5). P. 66–69.
3. Lund. K. Cleanroom Challenges in the Pharmaceutical Industry. *14644.dk*. 2024. URL : <https://www.14644.dk/cleanroom-challenges-in-the-pharmaceutical-industry> (date of access: 16.09.2025).
4. Sandle T. Focusing on the Operator: Reducing Facility Environmental Contamination. *American Pharmaceutical Review*. 2019. URL : <https://www.americanpharmaceuticalreview.com/Featured-Articles/360325-Focusing-on-the-Operator-Reducing-Facility-Environmental-Contamination/> (date of access: 16.09.2025).
5. Yang, Z., Hao, Y., Shi, W., et al. (2021). Field test of pharmaceutical cleanroom cleanliness subject to multiple disturbance factors. *Journal of Building Engineering*. 2021. № 42 (2). 103083. URL : <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103083> (date of access: 16.09.2025).
6. HEPA Vs ULPA Filters. (2025, January 22). URL : <https://www.liberty-ind.com/blog/hepa-vs-ulpa-filters/> (date of access: 16.09.2025).
7. HEPA Vs ULPA Filters In Cleanrooms. (2025, February 17). URL : <https://csitestesting.com/hepa-vs-ulpa-filters-in-cleanrooms/> (date of access: 16.09.2025).
8. Karkare V. Green Pharma: How the Pharmaceutical Industry Is Embracing Sustainability. 2024. URL : <https://www.cornerstone-group.com/2024/04/12/green-pharma-how-the-pharmaceutical-industry-is-embracing-sustainability/> (date of access: 16.09.2025).
9. A. Sharma, J. Kaur. Internet of Things (IoT) in Pharmaceutical Manufacturing, Warehousing, and Supply Chain Management. *SN Computer Science*. 2020. Vol. 1(4). URL : <https://doi.org/10.1007/s42979-020-00248-2> (date of access: 16.09.2025).
10. D. K. Sharma, S. Bhargava, K. Singhal. Internet of Things applications in the pharmaceutical industry. *An Industrial IoT Approach for Pharmaceutical Industry Growth*. 2020. Chapter 6. Vol. 2. P. 153-190.

References

1. Eckford, C. (2024, April 15). Seasonal variation of microbial contamination in pharmaceutical cleanrooms. *European Pharmaceutical Review*.
2. Singer, D., & Hoal, M. (2024). Cleanroom disinfection: Maintaining sterility by design. *American Pharmaceutical Review*, 27(5), 66–69.
3. Lund, K. (2024, October 30). Cleanroom challenges in the pharmaceutical industry. *14644.dk*.
4. Sandle, T. (2019, April 23). Focusing on the operator: Reducing facility environmental contamination. *American Pharmaceutical Review*.
5. Yang, Z., Hao, Y., Shi, W., et al. (2021). Field test of pharmaceutical cleanroom cleanliness subject to multiple disturbance factors. *Journal of Building Engineering*, 42, 103083.
6. HEPA Vs ULPA Filters. (2025, January 22). Retrieved from <https://www.liberty-ind.com/blog/hepa-vs-ulpa-filters/>
7. HEPA Vs ULPA Filters in Cleanrooms. (2025, February 17). Retrieved from <https://csitesting.com/hepa-vs-ulpa-filters-in-cleanrooms/>
8. Karkare, V. (2024). Green pharma: How the pharmaceutical industry is embracing sustainability. Retrieved from <https://www.cornerstone-group.com/2024/04/12/green-pharma-how-the-pharmaceutical-industry-is-embracing-sustainability/>
9. Sharma, A., & Kaur, J. (2020, July 16). Internet of Things (IoT) in pharmaceutical manufacturing, warehousing, and supply chain management. *SN Computer Science*, 1(4). <https://doi.org/10.1007/s42979-020-00248-2>
10. Sharma, D. K., Bhargava, S., & Singhal, K. (2020). Internet of Things applications in the pharmaceutical industry. In *An industrial IoT approach for pharmaceutical industry growth* (Vol. 2, pp. 153–190).

Дата першого надходження рукопису до видання: 15.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

О. О. МЕЛЬНИК

кандидат технічних наук,
доцент кафедри технології машинобудування
Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-8667-4262

Ю. Ю. ВАРИВОДА

кандидат технічних наук,
доцент кафедри процесів та апаратів харчової інженерії
Львівський національний університет ветеринарної медицини
та біотехнологій імені С. З. Гжицького
ORCID: 0009-0008-2779-2366

А. А. СУБІН

кандидат технічних наук,
доцент кафедри технології машинобудування
Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-5747-2397

РОЗРОБКА ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО ЗНОСУ ВИРОБНИЧОГО ОБЛАДНАННЯ

З метою підвищення ефективності управління виробничими процесами та прогнозування технічного зносу обладнання у роботі досліджено особливості застосування цифрових технологій у реальному секторі економіки, що охоплює як індустріальні, так і агропромислові підприємства. Визначено, що цифрові двійники виступають базовим інструментом для створення віртуальної моделі фізичних об'єктів, здатної відтворювати їхній стан у реальному часі на основі даних, отриманих із сенсорів IoT, алгоритмів машинного навчання та аналітики великих даних. Метою дослідження є обґрунтування ефективності впровадження цифрових двійників у систему управління технічним станом виробничих засобів і визначення переваг та ризиків цифрової трансформації. Для досягнення мети застосовано методи аналізу, синтезу та узагальнення.

Показано, що використання технологій штучного інтелекту, IoT та Big Data сприяє підвищенню продуктивності підприємств на 20–30 %, зменшенню операційних витрат на 15–25 % і скороченню часу простоїв обладнання. У роботі систематизовано ключові фактори успішного впровадження цифрових технологій, серед яких розвиток компетентностей персоналу, стратегічне планування інтеграції систем і посилення кіберзахисту. Запропоновано концепцію поетапного впровадження цифрових двійників у структуру підприємств із метою підвищення точності діагностики, зменшення аварійності та оптимізації ремонтних процесів. Визначено основні виклики цифровізації, серед яких високі початкові витрати, дефіцит кваліфікованих кадрів і ризики кібербезпеки. З огляду на це, рекомендовано посилити підготовку персоналу, упровадити навчальні програми та вдосконалити політику інформаційного захисту. Отримані результати можуть бути використані для формування інтегрованих систем прогнозування стану технічних засобів у межах концепції «розумного виробництва» та подальшої цифрової трансформації промислових підприємств.

Ключові слова: цифрові технології, виробничі процеси, управління, автоматизація, продуктивність, IoT, штучний інтелект, Big Data.

O. O. MELNYK

Ph.D. in Engineering,
Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology
Educational and Research Institute of Mechanical Engineering
of National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-8667-4262

YU. YU. VARYVODA

Ph.D. in Engineering,
Associate Professor at the Department of Processes
and Apparatus of Food Engineering
Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine
and Biotechnologies Lviv
ORCID: 0009-0008-2779-2366

A. A. SUBIN

PhD in Engineering,
Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology
Institute of Mechanical Engineering
of National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0002-5747-2397

DEVELOPMENT OF DIGITAL TWINS FOR PREDICTING TECHNICAL WEAR OF PRODUCTION EQUIPMENT

The study explores the features of digital technology implementation in the real sector of the economy, encompassing both industrial and agro-industrial enterprises, with the aim of improving the efficiency of production process management and predicting the technical wear of equipment. It is determined that digital twins serve as a fundamental tool for creating virtual models of physical objects capable of reproducing their condition in real time based on data obtained from IoT sensors, machine learning algorithms, and big data analytics.

The purpose of the study is to substantiate the effectiveness of implementing digital twins in systems for managing the technical condition of production assets and to identify the advantages and risks of digital transformation. To achieve this goal, methods of analysis, synthesis, and generalization were applied.

It is shown that the use of artificial intelligence, IoT, and Big Data technologies contributes to increasing enterprise productivity by 20–30%, reducing operating costs by 15–25%, and decreasing equipment downtime. The study systematizes the key factors for the successful implementation of digital technologies, including personnel competency development, strategic system integration planning, and strengthening of cybersecurity. A concept for the phased introduction of digital twins into enterprise structures is proposed to improve diagnostic accuracy, reduce accident rates, and optimize maintenance processes.

The main challenges of digitalization are identified, such as high initial costs, shortage of qualified personnel, and cybersecurity risks. Therefore, it is recommended to enhance staff training, introduce educational programs, and improve information protection policies. The obtained results can be used to develop integrated systems for predicting the condition of technical assets within the framework of the “smart manufacturing” concept and to further advance the digital transformation of industrial enterprises.

Key words: digital technologies, production processes, management, automation, productivity, IoT, artificial intelligence, Big Data.

Постановка проблеми

У сучасному реальному секторі економіки, який охоплює як індустріальне, так і агропромислове виробництво, виникають численні виклики, зокрема проблеми технічного зносу обладнання, подолання яких потребує інноваційних підходів до управління виробничими процесами. Зношене устаткування знижує ефективність виробництва і може призводити до аварій, технологічних збоїв та фінансових втрат, що підкреслює важливість розробки нових методів прогнозування зносу.

Цифрові двійники (далі – ЦД), що використовуються як віртуальні аналоги фізичних об’єктів, дозволяють здійснювати детальний аналіз стану обладнання в реальному часі на основі даних IoT, систем штучного інтелекту та BigData для моделювання його поведінки й оптимізації технічного обслуговування.

Проте впровадження ЦД супроводжується низкою викликів, таких як високі початкові витрати, необхідність спеціалізованих знань, інтеграції з наявними виробничими системами та забезпечення кібербезпеки даних.

Дослідження ЦД у контексті прогнозування технічного зносу є актуальним, оскільки поєднує теоретичні аспекти цифрових технологій із практичними завданнями реального сектору економіки, що охоплює промислові й агропромислові підприємства. Актуальність теми полягає у необхідності підвищення ефективності виробництва через упровадження сучасних цифрових технологій (далі – ЦТ). Це сприятиме зміцненню конкурентоспроможності підприємств на глобальному ринку та формуванню практичних рекомендацій щодо оптимізації впровадження ЦД.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз наукових публікацій демонструє активне вивчення інтеграції сучасних цифрових технологій з метою підвищення надійності виробничих систем. Значна увага приділяється розробці та впровадженню цифрових двійників у контексті промислового Інтернету речей (далі – IoT) для прогнозування технічного стану обладнання. Так, І. Невлюдов, С. Новосьолов та О. Сичова представили архітектуру автоматизованої системи управління технологічними процесами, основу на концепції розумного заводу. У цій роботі ЦД, тісно інтегровані з IoT, використовуються для моделювання виробничих процесів та прогнозування їхнього розвитку, що своєю чергою забезпечує вдосконалення децентралізованого управління [1]. Розвиваючи цю тезу, І. Невлюдов, С. Новосьолов, О. Сичова, В. Гопесенко та Н. Косенко запропонували моделі децентралізованого управління, специфічні для умов Індустрії 4.0, акцентуючи увагу на необхідності вбудовування сенсорних систем у кіберфізичні системи для досягнення високої точності прогнозів зносу [2].

С. Аттаран (S. Attaran), М. Аттаран (M. Attaran) та Б. Г. Челік (B. G. Celik) підтверджують критичну роль ЦД у верифікації експлуатаційних характеристик та оцінюванні залишкового ресурсу механізмів, хоча і вказують на методологічні труднощі у чіткому розмежуванні функціоналу ЦД порівняно із традиційними методами моделювання [3].

Паралельно з технічними аспектами в низці досліджень розглядається ширший вплив цифровізації. Так, І. Томашук, Ю. Сусіденко та М. Бурдяк фокусують свою увагу на макро- та мікроекономічних наслідках, пов'язуючи впровадження цифрових рішень з екологічними цілями, зокрема моніторингом екологічного сліду для забезпечення сталого розвитку, навіть у такому специфічному секторі, як аграрний [4]. М. Бурдяк та І. Томашук також демонструють, як принципи Четвертої промислової революції трансформують бізнес-моделі в сільському господарстві, стимулюючи сталий розвиток цієї сфери [5]. І. Гончарук та І. Томашук підкреслюють, що для реалізації цих змін в аграрному секторі критично необхідним є впровадження інноваційно-інвестиційної моделі, де стратегічні інновації та ресурсозберігаючі технології забезпечують комплексні економічні, соціальні та екологічні вигоди, стимульовані синергією держави, бізнесу та науки [6].

Окрім апаратних та виробничих рішень, значна частина наукової уваги зосереджена на ролі ІІІ. К. Чен (K. Chen) визначає ІІІ як основну рушійну силу сучасних технологічних інновацій та промислової трансформації, що має глибокий вплив як на глобальну економіку, так і на внутрішні процеси організацій [7].

Як зазначають А. Малік (A. Malik), П. Будвар (P. Budhwar) та Б. П. Казмі (B. A. Kazmi), попри доведену здатність ІІІ підвищувати продуктивність у сфері управління людськими ресурсами (УЛР), спостерігається дефіцит чіткої стратегічної бази для HR-менеджерів щодо ефективної інтеграції цих інструментів. Це зумовлює суттєву трансформацію робочих процесів і ролей працівників [8].

На думку М. Дарон (M. Daroń) і М. Гурської (M. Górska), ІІІ став глобальним стандартом, який визначає ринкові переваги та формує нові бізнес-моделі, при цьому особливу увагу вони приділяють потребі посилення регулювання його використання. Це проілюстровано на прикладі впливу ІІІ на підприємництво за даними Євростату [9].

У дослідженні Х. Ван (H. Wang) підкреслюється, що для підвищення операційної ефективності й конкурентоспроможності в умовах цифрової трансформації підприємствам Китаю необхідно створити систему управління на основі даних, розвивати кадровий потенціал у сфері штучного інтелекту та впроваджувати інтелектуальні системи менеджменту, узгоджені з національною стратегією розвитку цифрової економіки [10].

Отже, аналіз останніх досліджень показує, що розробка ефективних механізмів прогнозування зносу виробничого обладнання нерозривно пов'язана з повноцінною інтеграцією кіберфізичних систем IoT, потужним аналітичним апаратом ЦД та застосуванням алгоритмів ІІІ. Виявлено, що технічні аспекти моделювання та інтеграції досить добре вивчені, однак залишається прогалина у формуванні уніфікованих стратегічних рамок для повноцінного використання потенціалу цих технологій у контексті управління активами, а також у доведенні прямого економічного ефекту від застосування ЦД в прогнозуванні зносу на рівні, порівнянному з наявними дослідженнями щодо ІІІ та цифровізації загалом. Подальше дослідження має на меті заповнити цю прогалину шляхом розробки верифікованої моделі ЦД, орієнтованої саме на точне прогнозування залишкового ресурсу обладнання.

Формулювання мети дослідження

Мета статті: вивчення впливу ЦТ на ефективність управління виробничими процесами в промисловості, а також визначення основних переваг і викликів, пов'язаних із їх впровадженням.

Завдання статті:

1. Проаналізувати сучасні ЦТ, що використовуються в управлінні виробничими процесами, такі як IoT, Big Data та ІІІ.
2. Визначити основні переваги впровадження ЦТ у виробництво.
3. Описати можливі виклики та ризики, пов'язані з інтеграцією ЦТ у виробничі процеси, а також запропонувати рекомендації для їх подолання.

Викладення основного матеріалу дослідження

Цифрові двійники – це концептуально-методологічна конструкція, що є віртуальним, динамічно оновлюваним аналогом фізичного об'єкта, процесу чи системи. У контексті прогнозування технічного зносу виробничого обладнання ЦД функціонує як динамічний віртуальний аналог фізичного активу. Він об'єднує точну геометричну та функціональну реплікацію цього активу з постійним потоком даних у режимі реального часу, отриманих через IoT-датчики (наприклад, температура, вібрація, навантаження). На основі цих даних та вбудованих фізичних моделей двійник симулює процеси деградації компонентів. Інтегровані алгоритми машинного навчання ШІ здійснюють прогностичну аналітику, що дає змогу точно визначати час до критичного збою та оцінювати вплив різних експлуатаційних режимів.

ЦД стають незамінним інструментом для оптимізації технічного обслуговування та запобігання незапланованим зупинкам виробництва. Ця можливість реалізується завдяки сучасним ЦТ, таким як IoT, Big Data та ШІ, які відіграють ключову роль в управлінні виробничими процесами, підвищуючи загальну ефективність підприємств та знижуючи операційні витрати.

IoT – це комплексна структура, що охоплює взаємопов'язані фізичні об'єкти, людей, системи та інформаційні ресурси. Ця концепція дозволяє створювати мережі пристроїв, здатних обробляти дані як з реального, так і з віртуального середовища, а також реагувати на них. Мережі IoT безперервно акумулюють інформацію, аналізують її та виконують автоматизовані дії на основі отриманих даних [11, с. 218]. IoT базується на сенсорах, які вимірюють фізичні параметри, перетворюючи їх на цифрові дані, та кінцевих точках для їх агрегації й передачі [12, с. 55].

ЦД, використовуючи дані сенсорів IoT у реальному часі, створюють віртуальні моделі фізичних об'єктів для прогнозування стану та технічного зносу. Така інтеграція забезпечує своєчасне виявлення проблем та оптимізацію обслуговування.

Принципи роботи IoT включають постійний моніторинг фізичних явищ сенсорами, передачу зібраних даних через мережі з використанням різних протоколів та подальшу аналітичну обробку (включно з машинним навчанням) для виявлення аномалій та генерації рекомендацій [11, с. 219; 13].

Інтеграція IoT і ЦД є критично важливою для промисловості, оскільки сприяє підвищенню ефективності, зниженню витрат та запобіганню аваріям шляхом точного прогнозування технічного зносу.

У промисловості IoT використовується для предиктивного обслуговування та автоматизації. Наприклад, Rolls-Royce реалізує проєкт Intelligent Engine, що передбачає застосування «розумних» авіадвигунів, які можуть взаємодіяти між собою і з мережею підтримки. Ці двигуни «вчаться» на основі попереднього досвіду й можуть адаптувати свої параметри роботи залежно від умов [14].

Ще один приклад – компанія JohnDeere, яка інвестує 250 млн дол. США у стартап Bear Flag Robotics для автоматизації тракторів. Трактори використовують камери та радары, підключені до хмарної платформи, що дозволяє їм самостійно обробляти поля і збирати дані для клієнтів. Власники ферм можуть переглядати результати роботи через смартфони або ПК [15].

IoT у промисловості не лише підвищує ефективність виробництв, але й пропонує інноваційні механізми для вирішення актуальних проблем, таких як нестача кваліфікованої робочої сили в сільському господарстві. Автономні технології слугують безпечною і продуктивною альтернативою для подолання зазначених викликів. У цьому контексті аналіз BigData стає важливим інструментом, що дає змогу підприємствам оптимізувати необхідні процеси та приймати обґрунтовані рішення на основі отриманих даних.

Big Data охоплюють значні масиви як структурованої, так і неструктурованої інформації, що генерується внаслідок діяльності підприємств і технологічних процесів. Вони характеризуються великими обсягами, високою швидкістю обробки та різноманітністю, що робить їх ключовим інструментом для оптимізації виробництв, прогнозування зносу обладнання та підвищення ефективності. Використання технологій аналізу Big Data дозволяє виявляти закономірності в роботі обладнання та покращувати логістичні процеси, сприяючи зниженню витрат і підвищенню якості продукції [16, с. 3].

Сенсорні технології забезпечують моніторинг стану обладнання в реальному часі, а хмарні сервіси дають змогу ефективно зберігати та обробляти ці дані. Програмне забезпечення, таке як Hadoop і Spark, допомагає виявляти корисні патерни, а алгоритми машинного навчання використовуються для прогнозування зносу на основі історичних даних.

Штучний інтелект також стає важливим елементом управління виробництвом, забезпечуючи оптимізацію процесів, зниження витрат і підвищення продуктивності через новітні технології, зокрема такі, як глибинне навчання та робототехніка (див. табл. 1) [16, с. 4].

Алгоритми машинного навчання застосовуються для аналізу даних продажів, що дає змогу точно передбачати майбутній попит на продукцію, сприяючи ефективному плануванню виробництва та управлінню запасами. Аналіз великих даних допомагає компаніям виявляти проблеми в ланцюгах постачання та оптимізувати їх, що веде до зниження витрат і покращення термінів доставки.

Таблиця 1

Основні алгоритми та технології ШІ

Алгоритми та технології ШІ	Опис
Машинне навчання	Завдяки сучасним технологіям системи здатні аналізувати інформацію, виявляти закономірності та ухвалювати рішення з мінімальним людським втручанням. Ці технології активно використовуються для прогнозування попиту, управління запасами та налагодження взаємин з клієнтами
Глибинне навчання	Як складова машинного навчання, глибинне навчання застосовує багатошарові нейронні мережі для обробки складних наборів даних, дозволяючи вирішувати завдання, пов'язані з розпізнаванням образів і мовлення. Це особливо корисно в таких сферах, як оцінювання кредитних ризиків та планування технічного обслуговування
Обробка природної мови	Технологія надає комп'ютерам можливість інтерпретувати та генерувати людську мову. Вона широко використовується для автоматизації обслуговування клієнтів через чат-боти і віртуальних асистентів, а також для аналізу споживчих настроїв
Комп'ютерний зір	Системи комп'ютерного зору мають здатність інтерпретувати візуальну інформацію, що робить їх корисними для контролю якості продукції, автоматизації інвентаризаційних процесів і моніторингу робочих потоків
Робототехніка	Використання роботизованих систем для виконання небезпечних або рутинних завдань сприяє підвищенню ефективності виробництва та зменшенню ризиків для працівників
Експертні системи	Програмні рішення імітують процес прийняття рішень експертами в різних галузях, що дозволяє здійснювати діагностику проблем та прогнозування майбутніх подій

Джерело: узагальнено на основі [17, с. 4].

Системи комп'ютерного зору автоматично визначають дефекти на виробничих лініях, забезпечуючи високу якість продукції. Чат-боти та віртуальні асистенти, використовуючи обробку природної мови (NLP), значно покращують взаємодію з клієнтами, надаючи оперативні відповіді на запити. Глибинне навчання також допомагає підприємствам прогнозувати потреби в технічному обслуговуванні обладнання, що зменшує час простою та витрати на ремонт [16, с. 4].

Дослідження McKinsey, проведене з 11 по 21 квітня 2023 року, виявило, що лише 22 % підприємств регулярно використовують ШІ у своїй діяльності. Опитування охопило 1684 учасників з різних регіонів, включаючи Європу та Північну Америку. Найбільше респондентів (14 %) зазначили використання ШІ в маркетингу і продажах, 13 % – у розробці нових товарів, а 10 % – у сервісних операціях. Третина організацій вже впроваджує ШІ в управлінні, а 40 % планують збільшити інвестиції в цю технологію [18].

Впровадження ШІ у виробничі процеси відкриває нові можливості для оптимізації та підвищення ефективності підприємств. Використання сучасних алгоритмів покращує управлінські рішення, що у свою чергу сприяє розвитку компаній. Інтеграція цифрових технологій позитивно впливає на операційну ефективність завдяки автоматизації та об'єднанню інформаційних платформ, що скорочує час виконання завдань і знижує ризик виникнення помилок. Дослідження свідчать, що підприємства, які впроваджують цифровізацію, можуть підвищити продуктивність на 20–30 %, оптимізуючи робочі процеси. Крім того, автоматизоване управління дозволяє зменшити операційні витрати на 15–25 %, а інвестиції в цифрові рішення досягають точки беззбитковості протягом 1–3 років, підтверджуючи їх фінансову доцільність [19, с. 4].

ЦТ також позитивно впливають на якість продукції. Впровадження новітніх технологій, таких як системи моніторингу в реальному часі та аналітика даних, забезпечує точний контроль виробничих процесів. Наприклад, дрони використовуються для оцінювання стану сільськогосподарських культур, а автоматизовані системи контролю якості гарантують відповідність стандартам безпеки у харчовій промисловості.

Адаптація ЦТ нерідко супроводжується технічними та фінансовими труднощами. Приміром, значні початкові витрати можуть стати перешкодою для малих і середніх підприємств, оскільки придбання апаратно-програмних комплексів часто перевищує їхні фінансові можливості. Інтеграція нових систем з наявними може сповільнювати впровадження та призводити до додаткових витрат, що підкреслює необхідність стратегічного планування.

Організаційні ризики потребують серйозної уваги, оскільки набуття нових навичок працівниками є критично важливим у контексті сучасних технологій. Недостатня підготовка може негативно вплинути на продуктивність і якість роботи, а опір змінам з боку співробітників – суттєво зашкодити цифровізації. Тому активне управління змінами і стратегічний підхід до інтеграції цифрових засобів необхідні для успішного впровадження інновацій.

Проблеми безпеки даних та інформаційно-технологічні загрози становлять істотний ризик при використанні цифрових інструментів. Кіберзагрози можуть призвести до витоку конфіденційної інформації або зупинки діяльності, тому важливо впроваджувати заходи для забезпечення цілісності даних. Особливу увагу слід приділити розробці надійних архітектур безпеки для середовищ цифрових двійників, що включають шифрування даних, багаторфакторну автентифікацію та системи моніторингу загроз у режимі реального часу. Забезпечення стійкості системи до зовнішніх та внутрішніх кібератак є необхідною умовою для довіри до прогнозних моделей зносу обладнання.

Проекти в аграрному секторі потребують комплексного підходу, що включає аналіз процесів і ресурсів підприємства для виявлення вразливостей та пріоритетів. На основі цього аналізу слід визначити цільові показники, такі як підвищення продуктивності та зниження витрат. Розробка детальної дорожньої карти інтеграції цифрових рішень є критично важливою для реалізації стратегії. Після завершення проєкту важливо постійно оцінювати його результати та коригувати стратегію відповідно до змін на ринку.

Ключовим аспектом успішної розробки ЦД є розвиток професійних навичок працівників. Для цього пропонується впровадження освітніх ініціатив, зокрема визначення необхідних компетенцій для ефективного використання нових технологій та створення спеціалізованих навчальних програм. Використання інтерактивних модулів, віртуальних семінарів і практичних тренінгів сприятиме швидкому засвоєнню нових інструментів. Залучення кваліфікованих фахівців до навчального процесу допоможе сформувати менторське середовище.

Систематичний моніторинг результатів навчання дозволить виявити прогалини у знаннях та оптимізувати програми підвищення кваліфікації. Забезпечення конфіденційності даних є важливим елементом розробки ЦД в агропромисловості. Рекомендується проводити оцінювання кіберризиків для виявлення загроз, розробити політику інформаційної безпеки, організувати навчальні сесії з кіберзахисту та впровадити системи проактивного моніторингу.

Отже, методологічні рекомендації щодо інтеграції цифрових інструментів як у промисловість, так і в аграрному секторі повинні охоплювати три ключові аспекти: технологічну імплементацію, розвиток людського капіталу та посилення кібербезпеки. Такий комплексний підхід є необхідним для успішної адаптації до нових умов функціонування та забезпечення сталого прогресу у сфері експлуатації виробничого обладнання.

Висновки

Дослідження показує, що сучасні цифрові технології відіграють ключову роль в управлінні виробничими процесами. Це може привести до збільшення продуктивності на 20–30 %, зменшення витрат на 15–25 % та покращення якості продукції. Проте, поряд із цими перевагами постають і виклики, такі як недостатня підготовленість працівників, високі початкові витрати та питання безпеки даних. Запропоновані рекомендації можуть полегшити інтеграцію цифрових технологій у виробництво.

Подальші дослідження варто зосередити на аналізі успішних випадків впровадження цифрових технологій у різних секторах та розробці адаптивних стратегій для малих і середніх підприємств. Важливим напрямом також є дослідження впливу нових технологій на управлінські рішення і формування інноваційних бізнес-моделей, заснованих на аналітиці даних та автоматизації.

Список використаної літератури

1. Невлюдов І., Новосьолов С., Сичова О. Метод децентралізованого керування технологічними процесами в інтелектуальному виробництві. *Інноваційні технології та наукові рішення для галузей*. 2025. № 1 (31). С. 166–179. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.1.166>
2. Decentralized information systems in intelligent manufacturing management tasks / I. Nevliudov et al. *Advanced Information Systems*. 2024. Vol. 8, no. 3. P. 100–110. URL: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.3.12> (date of access: 15.10.2025).
3. Attaran S., Attaran M., Celik B. G. Digital Twins and Industrial Internet of Things: Uncovering operational intelligence in industry 4.0. *Decision Analytics Journal*. 2024. Vol. 10. P. 100398. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100398> (date of access: 15.10.2025).
4. Томашук І., Сусіденко Ю., Бурдяк М. Глобальні тенденції розвитку світової економіки за умов цифровізації: екологічний аспект. *Бізнес-Навігатор*. 2024. № 2(75). DOI: <https://doi.org/10.32782/business-navigator.75-3>
5. Бурдяк М., Томашук І. Концептуальні засади формування стратегічних напрямків розвитку сільськогосподарських підприємств в умовах цифрування економіки. *Бізнес-Навігатор*. 2024. № 1 (74). DOI: <https://doi.org/10.32782/business-navigator.74-1>
6. Гончарук І., Томашук І. Вплив інноваційних процесів на підвищення конкурентоспроможності сільськогосподарських підприємств. *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки та практичної діяльності*. 2023. № 1(63). С. 30–47. DOI: <https://doi.org/10.37128/2411-4413-2023-1-3>
7. Chen K. Innovation of Enterprise Management in the Era of Artificial Intelligence. *International Journal of Global Economics and Management*. 2024. Vol. 2, no. 2. P. 281–285. URL: <https://doi.org/10.62051/ijgem.v2n2.35> (date of access: 15.10.2025).
8. Malik A., Budhwar P., Kazmi B. A. Artificial intelligence (AI)-assisted HRM: Towards an extended strategic framework. *Human Resource Management Review*. 2022. P. 100940. URL: <https://doi.org/10.1016/j.hrmr.2022.100940> (date of access: 15.10.2025).
9. Daroń M., Górska M. Enterprises development in context of artificial intelligence usage in main processes. *Procedia Computer Science*. 2023. Vol. 225. P. 2214–2223. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.10.212> (date of access: 15.10.2025).

10. Wang H. Analysis of the Impact of Artificial Intelligence on Modern Enterprise Management. *Modern Economics & Management Forum*. 2024. Vol. 5, no. 3. P. 495. URL: <https://doi.org/10.32629/memf.v5i3.2370> (date of access: 15.10.2025).
11. Гриб'юк О. О., Фільченко О. П. Специфіка використання Інтернет-технологій у підготовці майбутніх інженерів-програмістів у контексті змішаного навчання. *Інноваційна педагогіка*. 2025. Т. 2, № 85. С. 215–223. DOI: <https://doi.org/10.32782/ip/85.2.39>
12. Журило О., Ляшенко О. Архітектура та системи безпеки Інтернету речей на основі туманних обчислень. *Інноваційні технології та наукові рішення для промисловостей*. 2024. № 1 (27). С. 54–66. DOI: <https://doi.org/10.30837/itssi.2024.27.054>
13. Інтернет речей: що це таке та де застосовують?. *CyberCalm | Кіберзахист та кібербезпека простою мовою*. URL: <https://cybercalm.org/internet-rechej-shho-tse-take-ta-de-zastosovuyut/> (дата звернення: 15.10.2025).
14. Ukrinform. Rolls-Royce розробляє «розумний» авіадвигун, здатний ремонтувати сам себе. *Укрінформ – актуальні новини України та світу*. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-technology/2397104-rollsroyce-rozroblae-rozumnij-aviadvigun-zdatnij-remontuvati-sam-sebe.html> (дата звернення: 15.10.2025).
15. JohnDeere купить розробника автономних тракторів BearFlagRobotics. *Пропозиція – Головний журнал з питань агробізнесу*. URL: <https://propozitsiya.com/news/john-deere-kupyt-rozrobnyka-avtonomnykh-traktoriv-bear-flag-robotics> (дата звернення: 15.10.2025).
16. Максимова Ю. Значення великих даних у промисловості та економіці. *Економіка та суспільство*. 2021. Вип. 28. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-28-38> (дата звернення: 15.10.2025).
17. Орехов Д. Застосування штучного інтелекту в управлінні сучасним підприємством. *Економіка та суспільство*. 2024. № 64. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-64-143>
18. The state of AI in 2023: generative AI's breakout year. *McKinsey Company*. URL: <https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai-in-2023-generative-ais-breakout-year#/> (date of access: 15.10.2025).
19. Ярошук Р. Вплив цифрових технологій на підвищення ефективності аграрного виробництва. *Економіка та суспільство*. 2024. Вип. 68. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-58> (дата звернення: 15.10.2025).

References

1. Nevliudov, I., Novoselov, S., & Sychova, O. (2025). *Metod detsentralizovanoho keruvannya tekhnolohichnymy protsesamy v intelektualnomu vyrobnytstvi* [Method of decentralized control of technological processes in intelligent manufacturing]. *Innovatsiini tekhnolohii ta naukovy rishennia dlia haluzei*, 1(31), 166–179. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.1.166>
2. Nevliudov, I., Novoselov, S., Sychova, O., Gopejenko, V., & Kosenko, N. (2024). Decentralized information systems in intelligent manufacturing management tasks. *Advanced Information Systems*, 8(3), 100–110. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.3.12>
3. Attaran, S., Attaran, M., & Celik, B. G. (2024). Digital Twins and Industrial Internet of Things: Uncovering operational intelligence in Industry 4.0. *Decision Analytics Journal*, 10, 100398. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100398>
4. Tomashuk, I., Susidenko, Y., & Burdiak, M. (2024). *Hlobalni tendentsii rozvytku svitovoi ekonomiky za umov tsyfrovizatsii: ekolohichniy aspekt* [Global trends in world economic development under digitalization: ecological aspect]. *Biznes-Navihator*, 2(75). <https://doi.org/10.32782/business-navigator.75-3>
5. Burdiak, M., & Tomashuk, I. (2024). *Kontseptualni zasady formuvannya stratehichnykh napriamkiv rozvytku silskohospodarskykh pidpriemstv v umovakh tsyfrovannya ekonomiky* [Conceptual principles for forming strategic directions for agricultural enterprises development under economy digitalization]. *Biznes-Navihator*, 1(74). <https://doi.org/10.32782/business-navigator.74-1>
6. Honcharuk, I., & Tomashuk, I. (2023). *Vplyv innovatsiinykh protsesiv na pidvyshchennia konkurentospromozhnosti silskohospodarskykh pidpriemstv* [The influence of innovative processes on improving agricultural enterprises competitiveness]. *Ekonomika, finansy, menedzhment: aktualni pytannia nauky ta praktychnoi diialnosti*, 1(63), 30–47. <https://doi.org/10.37128/2411-4413-2023-1-3>
7. Chen, K. (2024). Innovation of enterprise management in the era of artificial intelligence. *International Journal of Global Economics and Management*, 2(2), 281–285. <https://doi.org/10.62051/ijgem.v2n2.35>
8. Malik, A., Budhwar, P., & Kazmi, B. A. (2022). Artificial intelligence (AI)-assisted HRM: Towards an extended strategic framework. *Human Resource Management Review*, 100940. <https://doi.org/10.1016/j.hrmr.2022.100940>
9. Daroń, M., & Górski, M. (2023). Enterprises development in context of artificial intelligence usage in main processes. *Procedia Computer Science*, 225, 2214–2223. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.10.212>
10. Wang, H. (2024). Analysis of the impact of artificial intelligence on modern enterprise management. *Modern Economics & Management Forum*, 5(3), 495. <https://doi.org/10.32629/memf.v5i3.2370>

11. Hrybiuk, O. O., & Filchenko, O. P. (2025). *Spetsyfika vykorystannia Internet-tekhnologii u pidhotovtsi maibutnikh inzheneriv-prohramistiv u konteksti zmishanoho navchannia* [Specifics of using Internet technologies in the training of future software engineers in the context of blended learning]. *Innovatsiina pedahohika*, 2(85), 215–223. <https://doi.org/10.32782/ip/85.2.39>
12. Zhurylo, O., & Liashenko, O. (2024). *Arkhitektura ta systemy bezpeky Internetu rechei na osnovi tumnykh obchyslen* [Architecture and security systems of the Internet of Things based on fog computing]. *Innovatsiini tekhnologii ta naukovy rishennia dlia promyslovosti*, 1(27), 54–66. <https://doi.org/10.30837/itssi.2024.27.054>
13. CyberCalm. (2025). *Internet rechei: shcho tse take ta de zastosovuiut?* [Internet of Things: what it is and where it is used]. *CyberCalm | Kiberzakhyst ta kiberbezpeka prostoiu movoiu*. <https://cybercalm.org/internet-rechej-shho-tse-take-ta-de-zastosovuyut/>
14. Ukrinform. (2025). Rolls-Royce rozrobliaie “rozumnyi” avidvyhun, zdatnyi remontuvaty sam sebe [Rolls-Royce develops a “smart” aircraft engine capable of self-repair]. *Ukrinform – aktualni novyny Ukrainy ta svitu*. <https://www.ukrinform.ua/rubric-technology/2397104-rollsroyce-rozroblae-rozumnij-aviadvigun-zdatnij-remontuvati-sam-sebe.html>
15. Propozytsiia. (2025). John Deere kupyv rozrobnyka avtonomnykh traktoriv Bear Flag Robotics [John Deere acquires developer of autonomous tractors Bear Flag Robotics]. *Propozytsiia – Holovnyi zhurnal z pytan ahrobiznesu*. <https://propozitsiya.com/news/john-deere-kupyt-rozrobnyka-avtonomnykh-traktoriv-bear-flag-robotics>
16. Maksymova, Yu. (2021). *Znachennia velykykh danykh u promyslovosti ta ekonomitsi* [The importance of big data in industry and economy]. *Ekonomika ta suspilstvo*, (28). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-28-38>
17. Oriekhov, D. (2024). *Zastosuvannia shtuchnoho intelektu v upravlinni suchasnym pidpriemstvom* [Application of artificial intelligence in modern enterprise management]. *Ekonomika ta suspilstvo*, (64). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-64-143>
18. McKinsey & Company. (2023). *The state of AI in 2023: Generative AI's breakout year*. <https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/our-insights/the-state-of-ai-in-2023-generative-ais-breakout-year#/>
19. Yaroshchuk, R. (2024). *Vplyv tsyfrovyykh tekhnologii na pidvyshchennia efektyvnosti ahrarnoho vyrobnytstva* [Impact of digital technologies on increasing the efficiency of agricultural production]. *Ekonomika ta suspilstvo*, (68). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-58>

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 17.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

А. М. НЕКРИЛОВ

технік-монтажник

ORCID: 0009-0004-2605-619X

ВИКОРИСТАННЯ НАХИЛЬНО-ЗСУВНОЇ ФУРНІТУРИ ПРИ ЗАСКЛЕННІ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ

Стаття досліджує переваги використання нахильно-зсувної фурнітури в системах скління житлових будівель з акцентом на підвищення енергоефективності, герметичності та конструктивної жорсткості порівняно з традиційними розсувними конструкціями. Мета дослідження полягає в обґрунтуванні конструктивних, тепло-технічних та експлуатаційних переваг нахильно-зсувної фурнітури для засклення житлових об'єктів, а також у визначенні оптимальних технічних рішень для забезпечення високої енергоефективності та довговічності. Методологія базується на інтегрованому підході, що поєднує розрахунково-аналітичні, графоаналітичні та експериментальні методи, з використанням нормативних документів в будівництві. Отримані наукові результати демонструють, що нахильно-зсувна фурнітура забезпечує щільне притискання стулок по периметру, підвищуючи значення індексу звукоізоляції R_w до 40 дБ, що перевищує традиційні розсувні системи зі щітковими ущільнювачами ($0,45-0,55 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ та 24-27 дБ). Визначено можливості інтеграції стулок масою до 300 кг у великогабаритні прорізи (до $3500 \times 3500 \text{ мм}$) з мінімальними деформаціями (прогин імпоста до 8-10 мм) за рахунок триточкової системи кріплення та компенсації температурних розширень (до 15 мм при $\Delta T=60^\circ\text{C}$). Порівняльний аналіз варіантів конструкцій (монолітна та двосекційна з міні-з'єднувачем) виявив оптимальну жорсткість (момент інерції до $2,3 \cdot 10^5 \text{ мм}^4$) та зменшення теплових втрат через термопрокладки ($\psi \leq 0,05 \text{ Вт/м}$).

Практична цінність дослідження полягає в розробці рекомендацій для проектування та монтажу енергоефективних віконних систем у житловому будівництві, що дозволить мінімізувати рівень тепловтрат, покращити акустичний комфорт та реалізувати панорамне скління без порушення будівельних норм. Запропоновані схеми кріплення сприяють оптимізації витрат на опалення та кондиціонування, а також підвищують експлуатаційний ресурс конструкцій. Перспективи подальших досліджень включають інтеграцію нахильно-зсувної фурнітури з технологіями «інтелектуального будинку», автоматизацію процесів відчинення та впровадження інноваційних ущільнювальних композитів для посилення безпекових параметрів.

Ключові слова: нахильно-зсувна фурнітура, енергоефективність, скління, віконні системи, теплотехнічний розрахунок, конструктивна жорсткість.

А. М. NEKRYLOV

Technician-Installer

ORCID: 0009-0004-2605-619X

USE OF TILT-AND-SLIDE FITTINGS IN THE GLAZING OF RESIDENTIAL BUILDINGS

The article explores the advantages of using tilt-and-slide fittings in residential glazing systems, with an emphasis on improving energy efficiency, airtightness, and structural rigidity compared to traditional sliding designs. The purpose of the study is to substantiate the structural, thermal, and operational advantages of tilt-and-slide fittings for glazing residential buildings, as well as to determine the optimal technical solutions to ensure high energy efficiency and durability. The methodology is based on an integrated approach that combines computational, analytical, graphical, and experimental methods, using regulatory documents in construction. The scientific results obtained demonstrate that tilt-and-slide fittings ensure a tight seal around the perimeter of the sashes, increasing the sound insulation index R_w to 40 dB, which surpasses traditional sliding systems with brush seals ($0.45-0.55 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ and 24-27 dB). It has been determined that sashes weighing up to 300 kg can be integrated into large openings (up to $3500 \times 3500 \text{ mm}$) with minimal deformation (impost deflection up to 8-10 mm) due to a three-point fastening system and compensation for thermal expansion (up to 15 mm at $\Delta T=60^\circ\text{C}$). A comparative analysis of design options (monolithic and two-section with a mini-connector) revealed optimal rigidity (moment of inertia up to $2.3 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$) and reduced heat loss through thermal spacers ($\psi \leq 0.05 \text{ W/m}$).

The practical value of the study lies in the development of recommendations for the design and installation of energy-efficient window systems in residential construction, which will minimize heat loss, improve acoustic comfort, and implement panoramic glazing without violating building codes. The proposed mounting schemes contribute to the optimization of heating and air conditioning costs, as well as increase the service life of structures. Prospects for further

research include the integration of tilt-and-slide fittings with “smart home” technologies, the automation of opening processes, and the introduction of innovative sealing composites to enhance safety parameters.

Key words: *tilt-and-slide hardware, energy efficiency, glazing, window systems, thermal calculation, structural rigidity.*

Постановка проблеми

Сучасне житлове будівництво дедалі більше орієнтується на поєднання архітектурної естетики, функціональної гнучкості та енергоефективності огорожувальних конструкцій. У цьому контексті особливої уваги заслуговує використання нахильно-зсувної фурнітури, яка стала одним із найперспективніших рішень у сфері світлопрозорих систем. На відміну від традиційних механізмів, така фурнітура забезпечує комбінований режим відкривання стулки, з можливістю нахилу для мікропровітрювання та зсуву для повного відкривання отвору, що дозволяє оптимізувати простір та підвищити ергономічність інтер'єру без втрати герметичності.

Основним технічним завданням при проектуванні і монтажі нахильно-зсувних систем є забезпечення надійного кріплення та точного позиціонування елементів фурнітури. Це пов'язано з високими експлуатаційними навантаженнями, оскільки маса стулки у великих панорамних системах може сягати 200-300 кг, а механізм відкривання має гарантувати плавний рух без деформацій і перекосів. Ключову роль у цьому відіграють напрямні, опорні ролики, анкерні з'єднання та система регулювальних вузлів, що мають забезпечити рівномірний розподіл навантаження між точками фіксації.

Увагу прикуто і до питання вибору матеріалів і технологічних рішень: застосування армованих профілів, терморозривів, високоточного свердління отворів та дотримання моментів затягування кріпильних гвинтів відповідно до технічних регламентів виробників. Неправильне кріплення чи відхилення від монтажних параметрів може призвести до розгерметизації вузлів, зниження звукоізоляції або навіть до руйнування рухомих елементів.

Таким чином, дослідження технічних особливостей, методів кріплення і монтажних принципів нахильно-зсувної фурнітури при закладенні житлових будівель має важливе значення для підвищення довговічності, надійності та енергоефективності сучасних віконних систем, що відповідають вимогам європейських стандартів і норм ДБН.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У науковому дискурсі акцент робиться на тому, що нахильно-зсувна фурнітура належить до критичних конструктивних компонентів, які детермінують функціональні характеристики, параметри герметичності та експлуатаційний ресурс світлопрозорих систем житлових об'єктів. Відповідно до напрацювань [12], [23], масштабне застосування цих механізмів зумовлене необхідністю інтеграції енергоефективності, ергономічності використання та архітектурної варіативності. Науковими працями [15], [25] обґрунтовується, що нахильно-зсувні системи забезпечують раціональну організацію природної вентиляції приміщень при одночасній мінімізації теплових втрат та посиленні безпекових параметрів конструкцій. Аналітичний огляд публікацій [1], [19] демонструє, що застосування сучасних матеріалів і монтажних технологій, нормованих актуальними положеннями ДБН та ДСТУ, забезпечує досягнення високого рівня герметичності з'єднань і покращення акустичних характеристик віконних блоків. Результати досліджень [14], [18] підтверджують, що комбінування фурнітури з металопластиковими склопакетами і профільними системами суттєво оптимізує експлуатаційні показники будівельних об'єктів. Актуальні напрями розвитку, виокремлені [11], [20], охоплюють автоматизацію процесів відчинення, конвергенцію з технологіями «інтелектуального будинку» та впровадження інноваційних ущільнювальних композитів. Узагальнюючи, нахильно-зсувна фурнітура постає як значущий елемент технологічної модернізації фасадних і віконних систем у сфері житлового будівництва.

Формулювання мети дослідження

Мета статті – дослідити конструктивні, теплотехнічні та експлуатаційні переваги від інсталяції нахильно-зсувної фурнітури при закладенні житлових будівель, а також визначення оптимальних технічних рішень для забезпечення високої енергоефективності, герметичності та довговічності віконних конструкцій.

Дослідження ґрунтується на сучасних конструктивно-технологічних рішеннях та нормативних вимогах до віконних і фасадних систем, зокрема регламентаціях ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель» [2], ДБН В.2.6-22:2001 «Вікна та двері. Правила проектування та монтажу» [3], а також європейських стандартах EN 1026:2016 та EN 12207:2016, які встановлюють класифікацію повітропроникності та методики випробування герметичності віконних конструкцій [26]. Емпіричну базу складають експериментальні дослідження та аналітичні моделі механічної поведінки великогабаритних стулок з нахильно-зсувними фурнітурними системами під впливом вітрових, термічних та монтажних навантажень.

Методологія побудована на інтегрованому підході, що синтезував розрахунково-аналітичні, графоаналітичні та експериментальні методи дослідження. Для визначення напружено-деформованого стану конструктивних елементів застосовано метод скінченних елементів (FEM), який забезпечив моделювання розподілу навантажень у триточковій системі фіксації стулки з масою до 300 кг. Теплотехнічний аналіз здійснено шляхом розрахунку коефіцієнтів теплопередачі та побудови ізотермічних полів у спеціалізованих програмних комплексах *Therm* та

Flixo Energy. Верифікація отриманих результатів проведена шляхом порівняння з нормативними параметрами класів повітропроникності, теплозахисту та граничних деформацій, визначених ДСТУ-Н Б В.2.6-146:2010, що підтверджує достовірність наукових висновків та практичну застосовність розроблених рекомендацій для сучасного житлового будівництва [7].

Викладення основного матеріалу дослідження

В практиці будівельного проектування та при зведенні житлових і громадських споруд віконні системи розглядаються не лише як елементи архітектурного оздоблення, але й як головні компоненти енергоефективності, мікроклімату та акустичного комфорту приміщення. Одним із найбільш поширених рішень, що активно використовувалися упродовж останніх десятиліть, є класичні розсувні системи зі щітковими ущільнювачами, конструктивна простота яких поєднується з достатньою функціональністю для експлуатації у помірному кліматичному поясі. Проте сучасні вимоги до енергоощадності будівель, які регламентуються національними стандартами (ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель» [2]), і європейськими нормами (EN ISO 10077-1, EN ISO 12567-2) [26], проявили відчутні недоліки з точки зору: повітропроникності, теплотехнічної однорідності та стабільності експлуатаційних характеристик у динамічних навантаженнях.

Класичні розсувні системи характеризуються наявністю двох або більше рухомих стулок, що переміщуються по горизонтальних напрямних за допомогою роликових опор, при цьому ущільнення між стулкою та рамою здійснюється переважно щітковим (текстильним) профілем із поліамідного або поліпропіленового волокна. Ущільнювачі виконують роль бар'єра від пилу та частково від проникнення повітря, однак не створюють герметичного замикання, що призводить до значних тепловтрат у холодний період року та зниження коефіцієнта опору теплопередачі. З огляду на це, у практиці проектування подібні варіанти систем все частіше замінюються комбінованими рішеннями з контурними еластомерними ущільненнями або нахильно-зсувною фурнітурою, які реально можуть забезпечити щільне притискання стулки до рами по всьому її периметру.

Крім того, відповідно до ДСТУ Б В.2.6-23:2009 «Конструкції будинків і споруд. Вікна та двері. Загальні технічні умови», віконні системи мають давати не лише нормативний рівень теплозахисту, але й тримати стабільність параметрів при циклічних впливах температури, вологості й вітрових навантажень [6]. Щіткові ущільнювачі, за таких умов, демонструють поступове зниження еластичності ворсу, осідання та забруднення, що призводить до утворення щілин у місцях з'єднання стулок і, як наслідок, до зростання витрат енергії на опалення або кондиціювання. У системах з контурним ущільненням, навпаки, використовується термоеластомер (EPDM, TPE або силікон), який не лише витримує багаторазові цикли деформацій, але й здатен зберігати герметичність при температурних коливаннях від -40 до $+80$ °C, що є вкрай необхідним для експлуатації в кліматичних умовах України.

Окремий фокус отримало питання акустичної ізоляції. Класичні розсувні системи з щітковими ущільнювачами мають знижений індекс ізоляції повітряного шуму (R_w), який у середньому становить 24-27 дБ, тоді як для сучасних житлових будівель нормативні вимоги ДБН В.1.1-31:2013 «Захист від шуму» передбачають мінімум 32 дБ для зовнішніх огорожувальних конструкцій [5]. Отже ми констатуємо, що навіть при використанні склопакетів із підвищеними звукоізоляційними властивостями повітряні щілини у місцях щіткового ущільнення нівелюють акустичний ефект. При таких даних нахильно-зсувна фурнітура, що забезпечує багатоточковий притиск, може підвищити рівень показника R_w до 40 дБ і вище, і наблизити всю систему до параметрів стаціонарних глухих вікон [10].

З точки зору монтажу та експлуатації, класичні розсувні системи зі щітковими ущільнювачами залишаються зручними у використанні завдяки простоті конструкції. Однак маємо зазначити, що їхній потенціал практично вичерпано у зв'язку з переходом будівельної галузі до стандартів енергоефективного будівництва, таких як ДБН В.2.6-79:2014 «Енергозбереження будівель» [4] та ДСТУ ISO 19467:2019 [8], що встановлюють вимоги до коефіцієнтів теплових потоків і мінімізації неконтрольованої інфільтрації. Системи зі щітковим ущільненням не відповідають вимогам до класу А за повітропроникністю, а їхня модернізація вимагає не тільки заміни всього ущільнювача, але й конструктивної переробки профільної системи для створення площинного притискання замість лінійного контакту [16].

Розвиток енергоефективного будівництва та динамічний попит на панорамні системи скління у житлових комплексах призвели до того, що сучасні архітектурні рішення дедалі частіше потребують застосування великогабаритних стулок, площа яких може перевищувати 5-6 м², а маса може досягати 300 кг і більше. Вже ці параметри виходять за межі можливостей стандартних поворотно-відкидних систем, які розраховані на масу стулки до 130-150 кг, відповідно до технічних умов ДСТУ Б В.2.6-23:2009 «Конструкції будинків і споруд» [6]. Вікна та двері. Загальні технічні умови». Натомість використання нахильно-зсувної фурнітури, що забезпечує одночасно функції відкидання та паралельного переміщення стулки, формує дійсно нові можливості для архітекторів і конструкторів. Ці конструкційні рішення – новий шлях по створенню прозорих фасадів без вертикальних розділювальних елементів при умовах повного збереження високої герметичності, теплоізоляції та стійкості до вітрових навантажень (рис. 1).

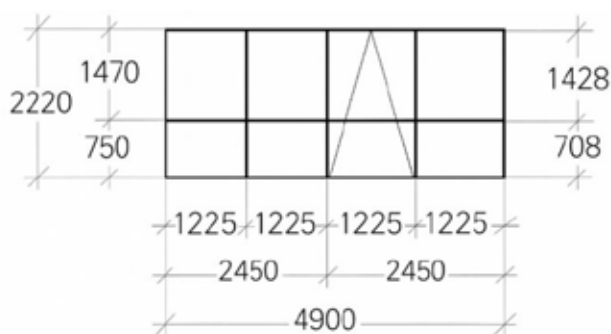


Рис. 1. Конструктивна схема віконного блоку з нахильно-зсувною стулкою та основними розмірами

Для обґрунтування доцільності використання нахильно-зсувної системи поставимо умови засклення віконного прорізу розміром 3500×3500 мм, що відповідає площі понад $12,25 \text{ м}^2$. Для таких габаритів маса одинарної склопакетної секції з тришаровим склом (загальна товщина 40 мм, щільність скла $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$) може бути визначена за допомогою формули:

$$m = \rho \cdot A \cdot t \quad (1)$$

де:

m – маса склопакета, кг;

ρ – щільність скла, кг/м^3 ;

A – площа склопакета, м^2 ;

t – сумарна товщина скла, м.

Підставимо значення:

$$m = 2500 \times 12,25 \times 0,018 = 551,25 \text{ кг}.$$

Бачимо, що навіть без урахування профільної системи маса одного склопакета перевищує 550 кг, що є критичним показником для класичних металопластикових конструкцій. Саме тому проектування такого типу інженерних рішень буде можливим лише за умов використання комбінованих профілів (алюміній із термовставкою або сталеве армування ПВХ-профілю) і підсилених бетонних основ, які здатні сприймати вагу та динамічні навантаження без порушення геометрії отвору [13].

Зазначаємо що надані вище розрахунки стосуються триплексного скління номінальною товщиною $6+6+6$ мм, тоді як у сучасній практиці житлового будівництва переважно застосовуються склопакетові конструкції типорозміру $4+4+4$ мм із сумарною товщиною 12 мм. Водночас підкреслюємо, що зазначене масове навантаження є інтегральною характеристикою для повної площі віконного прорізу. У реальному конструктивному виконанні подібні системи не реалізуються як монолітний блок, а сегментуються на 4–6 автономних склопакетових одиниць, кожна з яких оснащена індивідуальною системою фіксації та фурнітурним забезпеченням.

Однією з головних проблем великоформатних систем стає їхнє лінійне температурне розширення профілів. Для ПВХ коефіцієнт лінійного розширення становить:

$$\alpha_{\text{ПВХ}} = 7 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}.$$

При добовому коливанні температури від -20 до $+40$ $^\circ\text{C}$ різниця складає 60 $^\circ\text{C}$. Для довжини профілю $L = 3500$ мм будемо мати:

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T = 7 \times 10^{-5} \times 3500 \times 60 = 14,7 \text{ мм}.$$

Вигин або подовження профілю майже на 15 мм створить ризик втрати герметичності притворів, деформації склопакета і появи тріщин у зоні клейових швів [17]. Саме тому коли за проектом є великий отвір, застосовують металеві термопрофілі з низьким коефіцієнтом лінійного розширення та забезпечувати жорстке анкерне кріплення рами (а не імпоста) до несучих елементів будівлі. У розглянутій конфігурації горизонтальна залізобетонна балка над прорізом (наприклад, елемент монолітного пояса) використовується як точка опори для рами або для з'єднувального (стикового) профілю, що входить до складу рамного контуру. Анкерні пластины/кронштейни розміщують із регламентованим кроком, забезпечуючи передачу вертикальних і горизонтальних зусиль від стулків та скління безпосередньо на каркас споруди, при цьому імпост виконує лише функцію внутрішнього розподілу навантажень у межах системи. Це проектне рішення компенсує температурні деформації в межах рамного контуру, стабілізувати геометрію прорізу та знизити навантаження на нижній напрямний рейковий профіль, який у традиційних системах сприймає основну масу ступки [9].

У ДБН В.2.6-22:2001 «Вікна та двері. Правила проектування та монтажу» зазначено, що елементи віконних систем, які сприймають значне навантаження, повинні мати жорстке анкерне кріплення з кроком не більше 600 мм-700мм по горизонталі. Для стулок масою до 300 кг рекомендовано використовувати сталеві монтажні анкери діаметром 8-10 мм, із глибиною закладення не менше 80 мм у бетонну основу (рис. 2). Таким чином, конструктивна схема передачі навантаження передбачає розподіл ваги стулки на три вузлові зони:

- 1) Нижня напрямна рейка (основне статичне навантаження);
- 2) Верхній імпост (допоміжне підвищення та стабілізація);
- 3) Опора на горизонтальну балку (зменшення прогину профілю).

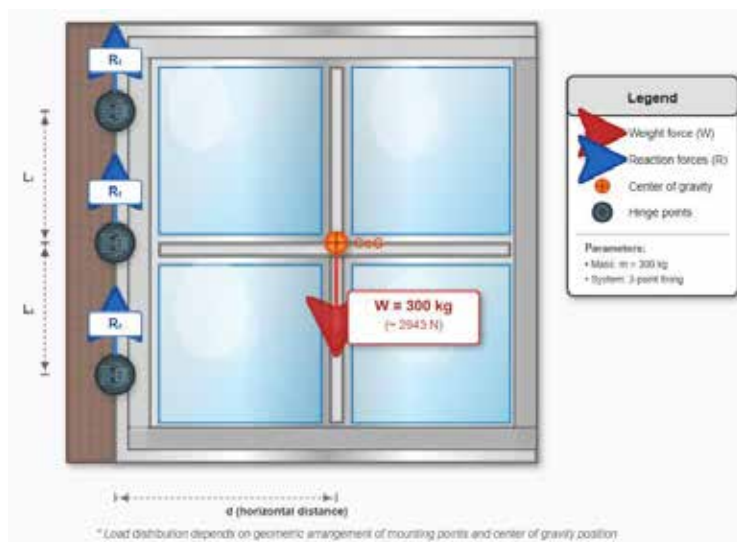


Рис. 2. Схема розподілу навантаження стулки масою 300 кг у триточковій системі кріплення

Перехід від класичної поворотно-відкидної системи до нахильно-зсувної змінює не лише технічну схему навантажень, але й архітектурну пластику фасаду. Якщо традиційне вікно вимагає статичних вертикальних членувань і обмеженої ширини створки (до 1600 мм), то зсувна система дозволяє реалізувати широкоформатні панелі з розміром однієї стулки до 2000-2500 мм без втрати герметичності. Ці рішення допомагають проектувальникам створювати фасади з горизонтальним ритмом та панорамним ефектом, що є необхідним у сучасних енергоефективних житлових комплексах, де природне освітлення стало це запорука комфорту. Для порівняння наведемо табл. 1, у якій показані типові граничні параметри різних систем.

Таблиця 1

Порівняльні параметри систем фурнітури для житлового будівництва

Тип фурнітури	Макс. маса стулки, кг	Макс. ширина стулки, мм	Коефіцієнт повітропроникності (EN 12207)	Сфера застосування
Поворотно-відкидна	130	1600	Клас 4	Стандартні вікна
Паралельно-зсувна	180	2000	Клас 4	Балконні двері
Нахильно-зсувна	300	2500	Клас 4	Панорамні системи
Розсувна з щітковим ущільненням	120	2000	Клас 2	Лоджії, тераси

При монтажі великогабаритних конструкцій точність геометрії є критичною умовою збереження функціональності системи. Згідно з вимогами ДСТУ-Н Б В.2.6-146:2010 «Настанова з проектування і монтажу світлопрозорих конструкцій», відхилення вертикалі для прорізів шириною понад 2500 мм не повинно перевищувати $\pm 1,5$ мм/м висоти, а загальне відхилення по діагоналі – не більше 3 мм [7]. Якщо проріз має значні нерівності, це призводить до перекосу напрямних рейок, унаслідок чого стулка масою 250-300 кг при зсуві створює нерівномірне навантаження на нижній роликовий вузол, що може викликати локальне руйнування профілю. Для запобігання цьому у практиці монтажу слід використовувати лазерну перевірку площинності та компенсувальні підкладки з алюмінієвих або полімерних прокладок, товщиною 1-3 мм, які встановлюються під напрямними рейками. Додатково, для забезпечення стійкості до вітрових навантажень, у профільних системах з великою площею стулки необхідно застосовувати внутрішні підсилювачі із замкнутого сталевого профілю перерізом 40×80×3 мм. Момент інерції елемента визначаємо за формулою:

$$I = \frac{(B \cdot H^3 - b \cdot h^3)}{12} \quad (3)$$

де:

B і H – зовнішні розміри профілю,

b і h – внутрішні розміри порожнини.

Для вказаних розмірів:

$$I = \frac{(80 \times 40^3 - 74 \times 34^3)}{12} = 3.62 \times 10^6 \text{ mm}$$

що дасть достатній рівень жорсткості для сприйняття згинального моменту до 150 Н·м без видимого прогину [22].

У разі наявності несучої горизонтальної балки, наприклад, залізобетонної перемички або сталевго ригеля, то конструкція може спиратися не безпосередньо через імпорт, а через рамну систему, що виконує функцію передавання навантаження від стулок і склопакетів на несучі елементи будівлі. У цій конфігурації імпорт розглядається лише як допоміжний елемент, який забезпечує внутрішню стабільність конструкції, тоді як основні зусилля сприймає саме рама, закріплена анкерними елементами до несучої частини прорізу.

І тоді вертикальні навантаження від маси стулки G і горизонтальні реакції, що виникають при відкриванні або закриванні, розподіляються через контур рами, а не через імпорт. Буде сформована статична схема, де опорна балка виконує роль точки передавання зусиль від рами, а напрямні профілі працюють лише на ковзання, зменшуючи ризик деформацій і підвищуючи довговічність системи. Такий підхід відповідає сучасним принципам монтажу нахильно-зсувних конструкцій і вимогам ДБН В.2.6-22:2001 щодо забезпечення жорсткості рамних вузлів.

Навантаження можна описати через систему рівнянь рівноваги:

$$\begin{cases} \sum F_y = 0 \Rightarrow R_1 + R_2 = G \\ \sum M_A = 0 \Rightarrow R_2 \cdot L = G \cdot \frac{L}{2} \end{cases} \quad (4)$$

де:

R_1, R_2 – реакції опор нижнього напрямного профілю;

L – довжина стулки;

$$G = m \cdot g = 300 \cdot 9.81 = 2943 \text{ H}. \quad (5)$$

І тоді, кожна з нижніх опор сприймає навантаження приблизно $R_1 = R_2 = 1470 \text{ H}$, що вимагає використання роликових вузлів із допустимим навантаженням не менше 150 кг на ролик. Для забезпечення жорсткості каркаса застосовується ПВХ профіль з армуванням 2 мм, або порожній алюмінієвий профіль (наприклад, 40×60×3 мм), що підвищить момент інерції елемента в зоні прогину до:

$$I = \frac{(B \cdot H^3 - b \cdot h^3)}{12} = \frac{(60 \cdot 40^3 - 54 \cdot 34^3)}{12} = 2.8 \times 10^6 \text{ mm}$$

Цей фактор обмежить прогин імпоста величиною $f \leq \frac{L}{300}$ тобто не більше 8-10 мм при ширині 3000 мм, що буде у відповідності до вимог ДСТУ-Н Б В.2.6-146:2010. Переваги цього варіанту:

- висока жорсткість конструкції завдяки триточковій схемі кріплення;
- можливість використання некаленого скла з товщиною 6-8 мм, оскільки ризик термічних деформацій мінімізується;
- зниження вартості за рахунок спрощення складання профільної системи.

Недоліки: складність монтажу через потребу у високоточному суміщенні отвору з напрямними балками та анкерами; додаткові вимоги до геометрії прорізу (допуск не більше $\pm 1,5$ мм/м) [21].

Варіант 2. Для нахильно-зсувних систем, що застосовуються у великоформатному склінні, конструкція виконується як єдина суцільна рама, у якій усі елементи працюють у складі монолітного замкненого контуру. Відсутність стикових зон усуває локальні послаблення жорсткості, полегшує герметизацію та зменшує ризики деформацій під дією експлуатаційних і вітрових навантажень.

У традиційних рішеннях виступи з'єднувальних профілів 20-30 мм могли формувати технічні зазори між віконним блоком і несучою частиною фасаду, що ускладнювало герметизацію (рис. 3).

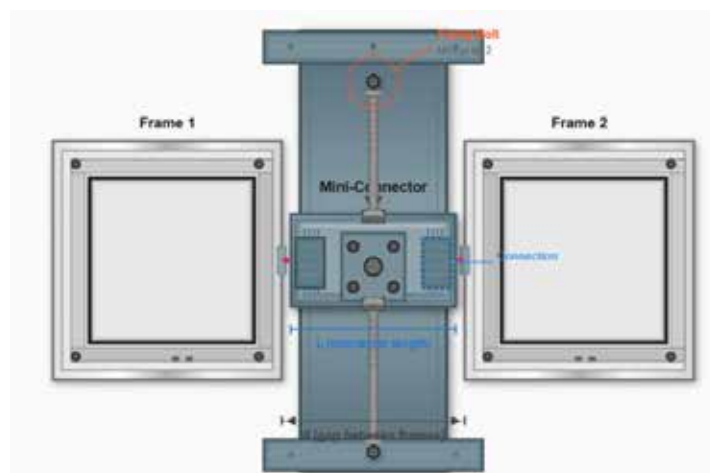


Рис. 3. Схема з'єднання двох рам через міні-з'єднувач із фіксацією до несучої балки

У суцільній схемі рама анкерується безпосередньо до несучої балки/перемички через монтажні пластини з регламентованим кроком; анкери працюють на зсув і згин одночасно, забезпечуючи комбіноване передавання зусиль на каркас будівлі без проміжних стиків. У вузлах кріплення застосовують термопрокладки (EPDM/поліамід 10-15 мм) для переривання теплотоку й мінімізації містків холоду. З огляду на відмову від будь-яких проміжних «міні-з'єднувачів», інженерні рішення концентруються на коректному рамному кріпленні:

1) Суцільне кріплення через отвір рамного профілю. Виконується свердління Ø6 мм із потайною головкою Ø10 мм; кріпильний елемент заглиблюється в несучу основу ≥ 60 мм і герметизується. Орієнтовна несуча здатність до 800 Н/гвинт; мінус, це видимість точки фіксації.

2) Кріплення за допомогою монтажних пластин, закріплених до спеціальних зачіпів рамного профілю використовується переважно на вертикальних частинах вікна (рис. 4).

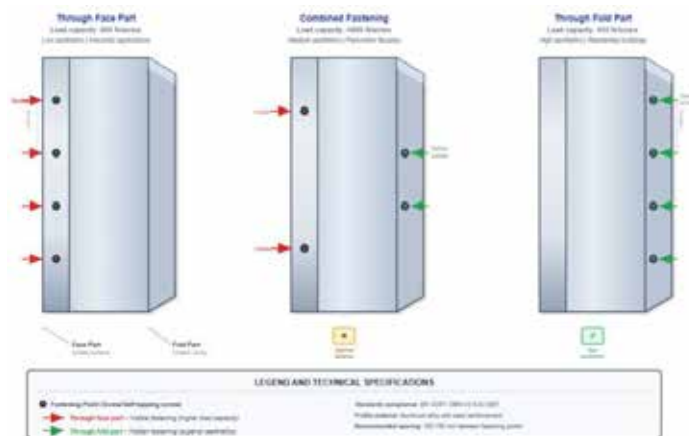


Рис. 4. Схема розташування точок кріплення профілю у фальцевій та лицьовій частинах

За відсутності проходження крізь сталеве армування несуча здатність орієнтовно до 450 Н/гвинт, чого достатньо для житлових блоків за умови правильного кроку анкерування. Порівняння варіантів кріплення наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика варіантів кріплення профілю

Спосіб кріплення	Несуча здатність одного гвинта, Н	Естетичність	Рекомендована сфера
Через лицьову частину	800	Низька	Промислові об'єкти
Через фальцеву частину	450	Висока	Житлові будівлі

Великі площі скління та наявність металевих елементів зумовлюють утворення містків холоду у місцях з'єднання імпоста з балкою. Відповідно до ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель», температура внутрішньої поверхні $t_{нов}$ має тоді бути не нижчою за точку роси, що визначається за умов:

$$t_{in} - t_{sp} \leq \Delta t_{add} \quad (6)$$

де:

$$t_{in}=20^{\circ}\text{C};$$

$$\Delta t_{add}=4^{\circ}\text{C} \text{ (для відносної вологості 60\%).}$$

Якщо температура зовнішнього повітря $t_{in}=-20^{\circ}\text{C}$, коефіцієнт теплопередачі профільного вузла $U=1.3 \text{ Вт/м}^2$, тоді тепловий потік:

$$q = U \cdot (t_{in} - t_{out}) = 1.3 \cdot 40 = 52 \text{ Вт/м}^2$$

Для зменшення втрат рекомендується застосовувати термопрокладки з EPDM або поліаміду товщиною 10-15 мм, що знижують лінійний коефіцієнт теплопередачі до $\psi \leq 0,05 \text{ Вт/м}$ (рис. 5).

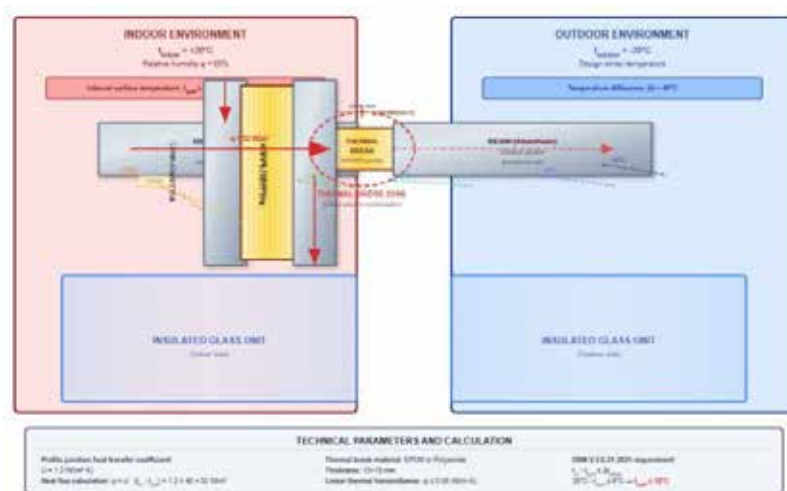


Рис. 5. Теплова схема вузла імпост–балка з термопрокладкою

Також доцільно виконати моделювання ізотерм у програмному середовищі (наприклад, *Therm 7.8* або *Flixo Energy*), щоб перевірити, що мінімальна температура внутрішньої поверхні не опускається нижче 16°C при зовнішніх -20°C . Для визначення оптимального рішення може бути використана бальна модель оцінювання (за критеріями міцності, монтажу, вартості, естетики й енергоефективності) (табл. 3) [10].

Таблиця 3

Порівняльна бальна оцінка ефективності конструктивних рішень

Параметр	Монолітна система	Двосекційна система
Жорсткість конструкції	5	4
Зручність монтажу	3	5
Герметичність стиків	5	4
Естетика фасаду	4	5
Вартість реалізації	3	4
Сумарна оцінка	20	22

З даних дослідження слідує що двосекційна система має перевагу при використанні в умовах серійного житлового будівництва, тоді як монолітна система з опорою на балку більш доцільна у преміальних або технічно складних фасадах, де жорсткість має пріоритетне значення.

Висновки

Результати експериментальних досліджень засвідчили невідповідність традиційних розсувних віконних конструкцій із щітковими ущільнювальними елементами актуальним нормативним вимогам щодо енергоефективності, герметичності та акустичного комфорту, регламентованим у ДБН В.2.6-31:2021 та EN ISO 12567-2. Встановлено, що при збільшенні площі світлопрозорого заповнення понад 10 м^2 зазначені системи

характеризуються критичним зниженням показників жорсткості конструкції та підвищеною повітропроникністю. Запропоноване конструктивно-технологічне рішення на основі нахильно-зсувної фурнітури реалізує механізм багатоточкового притискання стулки, що забезпечує рівномірний розподіл навантажень і герметичне прилягання по всьому периметру контуру ущільнення. Таке технічне рішення дозволяє досягти класу повітропроникності 4 згідно з EN 12207, підвищити індекс звукоізоляції до 40 дБ і гарантувати стабільність теплотехнічних характеристик у динамічних умовах експлуатації.

Підтверджено, що застосування суцільної рамної схеми без використання міні-з'єднувальних елементів формує якісно новий рівень конструкційної жорсткості та геометричної стабільності віконних конструкцій. Монолітна рамна система, закріплена безпосередньо до несучої балкової конструкції через монтажні анкерні пластини з модулем кроку 600–700 мм, забезпечує безпосередню передачу силових потоків без проміжних стикових з'єднань і мінімізує деформаційні процеси. Представлена конструктивна схема редукує прогин імпостного профілю до значень 8–10 мм за ширини прорізу 3 м та забезпечує опірність згинальному моменту до 150 Н·м. Інтеграція термокомпенсаційних прокладок із EPDM-полімеру номінальною товщиною 10–15 мм дозволяє знизити лінійний коефіцієнт теплопередачі до значення $\psi \leq 0,05$ Вт/м·К.

Результати верифікували, що інтеграція фурнітури з ПВХ профілями та рамним анкерним кріпленням формує конструктивну систему, оптимальну для реалізації енергоефективного та преміум-класу житлового будівництва. Зазначена конструкція забезпечує синергетичне досягнення високих показників герметичності, акустичної ізоляції та естетичної інтеграції у фасадну площину. Встановлено, що за умови технологічно коректного анкерування та прецизійного монтажу з лазерною верифікацією площинності система зберігає функціональну стабільність навіть за масових параметрів стулки до 300 кг. Це уможливило реалізацію панорамних архітектурних рішень без втрати теплової ефективності та підтверджує перспективність нахильно-зсувних систем як пріоритетного елемента сучасної архітектури.

Список використаної літератури

1. Дарієнко В. В., Плотніков О. А., Брайченко М. Л. «Світлопрозорі фасади висотних багатофункціональних будинків». Наукові записки (Кіровоградський національний технічний університет). 2010. № 10 (частина III). С. 181–186. URL: <https://files.core.ac.uk/download/pdf/84826033.pdf>
2. ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель». Київ: Мінрегіонбуд України, 2021. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=26677
3. ДБН В.2.6-22:2001 «Вікна та двері. Правила проєктування та монтажу». Київ: Мінрегіонбуд України, 2001. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=4829
4. ДБН В.2.6-79:2014 «Енергозбереження будівель». Київ: Мінрегіонбуд України, 2014. URL: (дана версія потребує уточнення)
5. ДБН В.1.1-31:2013 «Захист від шуму». Київ: Мінрегіонбуд України, 2013. URL: (дана версія потребує уточнення)
6. ДСТУ Б В.2.6-23:2009 «Конструкції будинків і споруд. Вікна та двері. Загальні технічні умови». Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=24890
7. ДСТУ-Н Б В.2.6-146:2010 «Настанова з проєктування і монтажу світлопрозорих конструкцій». Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. URL: https://wds.ua/wp-content/uploads/2019/01/DSTU_N_B_V.2.6-146_2010_PROEKTUVANNYA_I_ULASHTUVANNYA_VIKON_TA_DVEREY.pdf
8. ДСТУ ISO 19467:2019 «Теплові характеристики будівель. Визначення коефіцієнтів теплових потоків у реальних умовах». Київ: Мінрегіонбуд України, 2019. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=102152
9. Кашуба О. М., Якубовський В. Б. Формування фасадів через призму візуальної екології. Просторовий розвиток. 2022. № 1. С. 15–27. DOI: 10.32347/2786-7269.2022.1.15-27.
10. Кузель Л. М. Закономірності теплопередачі через віконні конструкції [Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, спеціальність 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплотехніка»]. Київ: Інститут технічної теплофізики НАН України, 2017. 190 с. URL: https://itf.kiev.ua/wp-content/uploads/2017/09/dissert_kuzhel_liliya-1.pdf
11. Македон В.В., Михайленко О.Г. Управління внутрішніми інвестиційними проєктами в регіональному промисловому кластері підприємств. Підприємництво та інновації. 2022. (25). С. 56–63. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-3583/25.9>
12. Нетеса К. М. Вдосконалення та визначення раціональних організаційно-технологічних рішень влаштування фасадних систем багатоповерхових цивільних будівель [Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, спеціальність 05.23.08 «Технологія та організація промислового і цивільного будівництва»]. Дніпро: Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна; Державний

вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», 2021. 163 с. URL: https://pgasa.dp.ua/wp-content/uploads/2021/04/dis_Netesa_KM.pdf

13. Новосад І.Г. Особливості створення комфортного житла при реконструкції типових житлових будинків. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2023. № 66. С. 191-201. DOI: 10.32347/2077-3455.2023.66.191-201.

14. Ратушняк Г. С., Панкевич О. Д., Панкевич В. В. Оцінювання енергоефективності світлопрозорих огороджувальних конструкцій будівель. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2022. № 2 (31). С. 81-87. DOI: 10.31649/2311-1429-2021-2-81-87.

15. Сердюк В. Р., Сердюк Т. В., Франишина С. Ю. Удосконалення огороджуючих конструкцій як джерело зниження теплових втрат сучасної будівлі. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2019. № 1 (26). С. 153-159. DOI: 10.31649/2311-1429-2019-1-153-159.

16. Сердюк Т. В., Франишина С. Ю. Актуальність реновації застарілого житлового фонду в контексті забезпечення його енергоефективності. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2021. № 1 (30). С. 140-147. DOI: <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2021-1-140-147>

17. Татарченко Г. О., Калачов Ю. О., Медвідь І. І., Поркуян С. Л. Аналіз скло-алюмінієвих фасадних конструкцій та систем кріплення. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2019. № 8 (256). С. 94-98. DOI: 10.33216/1998-7927-2019-256-8-94-98.

18. Bobyk V. V., Kramar H. M. Features of increasing the energy efficiency of buildings and transparent fencing structures. Вісник Тернопільського національного технічного університету. 2024. № 3 (115). p. 44-53. DOI: 10.33108/visnyk_tntu2024.03.044.

19. Carletti, C., Sciarpi, F., & Pierangioli, L. The Energy Upgrading of Existing Buildings: Window and Shading Device Typologies for Energy Efficiency Refurbishment. Sustainability. 2014. Vol. 6. No. 8. Pp. 5354-5377. DOI: 10.3390/su6085354.

20. Krarti M. Performance of PV-integrated dynamic overhangs applied to US homes. *Energy*. 2021. Vol. 230. Article 120843. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120843.

21. Makedon V., Myachin V., Alosyna T., Cherniavska I., Karavan N. Improving the readiness of enterprises to develop sustainable innovation strategies through fuzzy logic models. *Economic Studies (Ikonomicheski Izsledvania)*. 2025. Vol. 34. No. 5. P. 165–179. URL: https://archive.econ-studies.iki.bas.bg/2025/2025_05/2025_05_09.pdf

22. Michael M., Favoino F., Jin Q., Luna-Navarro A., Overend M. A Systematic Review and Classification of Glazing Technologies for Building Façades. *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 14. Art. 5357. DOI: 10.3390/en16145357.

23. Preservation Society. *Resilience Guidance: Windows and Doors*. Charleston, SC: The Preservation Society of Charleston, 2024. URL: <https://www.preservationsociety.org/wp-content/uploads/2024/07/6WindowsDoors.pdf>

24. Rezaei S. D., Shannigrahi S., Ramakrishna S. A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2017. Vol. 159 (Part B). Pp. 26 – 51. DOI: 10.1016/j.solmat.2016.08.026.

25. Yin X., Muhieddeen M. W., Razman R., Chung Ee J. Y., Chiong M. C. The potential effects of window configuration and interior layout on natural ventilation buildings: A comprehensive review. *Cleaner Engineering and Technology*. 2024. Vol. 23. p. 100830. DOI: 10.1016/j.clet.2024.100830.

26. Zukowski M. Study of Various Types of Glazing in a Building Constructed Using Hybrid Technology with a Large Window Area. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. No. 8. Art. 4488. DOI: 10.3390/app15084488.

References

1. Darienko, V. V., Plotnikov, O. A., & Braichenko, M. L. (2010). Svitloprozori fasady vysotnykh bahatofunktsionalnykh budynkiv [Transparent facades of high-rise multifunctional buildings]. *Naukovi zapysky (Kirovohradskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet)*, 10 (III), 181–186. <https://files.core.ac.uk/download/pdf/84826033.pdf> (in Ukrainian)

2. DBN V.2.6-31:2021. Teplova izoliatsiia budivel [Thermal insulation of buildings]. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2021. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=26677 (in Ukrainian)

3. DBN V.2.6-22:2001. Vikna ta dveri. Pravyla proiektuvannia ta montazhu [Windows and doors. Design and installation rules]. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2001. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=4829 (in Ukrainian)

4. DBN V.2.6-79:2014. Enerhozberezhennia budivel [Energy saving of buildings]. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2014. (in Ukrainian)

5. DBN V.1.1-31:2013. Zakhyst vid shumu [Noise protection]. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2013. (in Ukrainian)

6. DSTU B V.2.6-23:2009. Konstruktsii budynkiv i sporud. Vikna ta dveri. Zahalni tekhnichni umovy [Building structures. Windows and doors. General technical requirements]. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2009. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=24890 (in Ukrainian)

7. DSTU-N B V.2.6-146:2010. Nastanova z proektuvannia i montazhu svitloprozorykh konstruksii [Guidelines for the design and installation of translucent structures]. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2010. https://wds.ua/wp-content/uploads/2019/01/DSTU_N_B_V.2.6-146_2010_PROEKTUVANNYA_I_ULASHTUVANNYA_VIKON_TA_DVEREY.pdf (in Ukrainian)
8. DSTU ISO 19467:2019. Teplovi kharakterystyky budivel. Vyznachennia koefitsientiv teplovykh potokiv u realnykh umovakh [Thermal performance of buildings. Determination of heat flow coefficients under real conditions]. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2019. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=102152 (in Ukrainian)
9. Kashuba, O. M., & Yakubovskiy, V. B. (2022). Formuvannia fasadiv cherez pryzmu vizualnoi ekolohii [Formation of facades through the prism of visual ecology]. *Prostorovyi rozvytok*, 1, 15–27. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2022.1.15-27> (in Ukrainian)
10. Kuzhel, L. M. (2017). Zakonomirnosti teploperedachi cherez vikonni konstruksii [Regularities of heat transfer through window structures] (PhD thesis, Instytut tekhnichnoi teplofizyky NAN Ukrainy). Kyiv: ITTF NAN Ukrainy. https://itff.kiev.ua/wp-content/uploads/2017/09/dissert_kuzhel_liliya-1.pdf (in Ukrainian)
11. Makedon, V. V., & Mykhailenko, O. H. (2022). Upravlinnia vnurishnimy investytsiinymy proektamy v rehionalnomu promyslovomu klasteri pidpriemstv [Management of internal investment projects in a regional industrial cluster of enterprises]. *Pidpriyemnytstvo ta innovatsii*, 25, 56–63. <https://doi.org/10.32782/2415-3583/25.9> (in Ukrainian)
12. Netesa, K. M. (2021). Vdoskonalennia ta vyznachennia ratsionalnykh orhanizatsiino-tekhnologichnykh rishen vlashtuvannia fasadnykh system bahatopoverkhovykh tsyvilnykh budivel [Improvement and determination of rational organizational and technological solutions for the installation of facade systems of multi-storey civil buildings] (PhD thesis, Dnipro: Prydniprovskia derzhavna akademiia budivnytstva ta arkhitektury). https://pgasa.dp.ua/wp-content/uploads/2021/04/dis_Netesa_KM.pdf (in Ukrainian)
13. Novosad, I. H. (2023). Osoblyvosti stvorennia komfortnoho zhytla pry rekonstruksii typovykh zhytlovykh budynkiv [Features of creating comfortable housing during the reconstruction of typical residential buildings]. *Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia*, 66, 191–201. <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2023.66.191-201> (in Ukrainian)
14. Ratushniak, H. S., Pankevych, O. D., & Pankevych, V. V. (2022). Otsiniuvannia enerhoefektyvnosti svitloprozorykh ohorodzhuvalnykh konstruksii budivel [Evaluation of energy efficiency of transparent enclosing structures of buildings]. *Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruksii v budivnytstvi*, 2 (31), 81–87. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2021-2-81-87> (in Ukrainian)
15. Serdiuk, V. R., Serdiuk, T. V., & Franyshyna, S. Yu. (2019). Udoskonalennia ohorodzhuvalnykh konstruksii yak dzherelo znyzhennia teplovykh vtrat suchasnoi budivli [Improvement of enclosing structures as a source of reducing heat losses of a modern building]. *Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruksii v budivnytstvi*, 1 (26), 153–159. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2019-1-153-159> (in Ukrainian)
16. Serdiuk, T. V., & Franyshyna, S. Yu. (2021). Aktualnist renovatsii zastariloho zhytlovoho fondu v konteksti zabezpechennia yoho enerhoefektyvnosti [Relevance of renovation of outdated housing stock in the context of ensuring its energy efficiency]. *Suchasni tekhnolohii, materialy i konstruksii v budivnytstvi*, 1 (30), 140–147. <https://doi.org/10.31649/2311-1429-2021-1-140-147> (in Ukrainian)
17. Tatarchenko, H. O., Kalachov, Yu. O., Medvid, I. I., & Porkuian, S. L. (2019). Analiz sklo-aluminiievnykh fasadnykh konstruksii ta system kriplennia [Analysis of glass-aluminum facade structures and fastening systems]. *Visnyk Skhidnoukraiinskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*, 8 (256), 94–98. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2019-256-8-94-98> (in Ukrainian)
18. Bobyk, V. V., & Kramar, H. M. (2024). Features of increasing the energy efficiency of buildings and transparent fencing structures. *Visnyk Ternopilskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, 3 (115), 44–53. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2024.03.044
19. Carletti, C., Sciarpi, F., & Pierangioli, L. (2014). The Energy Upgrading of Existing Buildings: Window and Shading Device Typologies for Energy Efficiency Refurbishment. *Sustainability*, 6 (8), 5354–5377. <https://doi.org/10.3390/su6085354>
20. Krarti, M. (2021). Performance of PV-integrated dynamic overhangs applied to US homes. *Energy*, 230, Article 120843. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120843>
21. Makedon, V., Myachin, V., Alosyna, T., Cherniavska, I., & Karavan, N. (2025). Improving the readiness of enterprises to develop sustainable innovation strategies through fuzzy logic models. *Economic Studies (Ikonomicheski Izsledvania)*, 34 (5), 165–179. https://archive.econ-studies.iki.bas.bg/2025/2025_05/2025_05_09.pdf
22. Michael, M., Favoino, F., Jin, Q., Luna-Navarro, A., & Overend, M. (2023). A Systematic Review and Classification of Glazing Technologies for Building Façades. *Energies*, 16 (14), 5357. <https://doi.org/10.3390/en16145357>
23. Preservation Society. (2024). *Resilience Guidance: Windows and Doors*. Charleston, SC: The Preservation Society of Charleston. <https://www.preservationsociety.org/wp-content/uploads/2024/07/6WindowsDoors.pdf>

24. Rezaei, S. D., Shannigrahi, S., & Ramakrishna, S. (2017). A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 159 (Part B), 26–51. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.08.026>
25. Yin, X., Muhieldeen, M. W., Razman, R., Chung Ee, J. Y., & Chiong, M. C. (2024). The potential effects of window configuration and interior layout on natural ventilation buildings: A comprehensive review. *Cleaner Engineering and Technology*, 23, 100830. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100830>
26. Zukowski, M. (2025). Study of Various Types of Glazing in a Building Constructed Using Hybrid Technology with a Large Window Area. *Applied Sciences*, 15 (8), 4488. <https://doi.org/10.3390/app15084488>

Дата першого надходження рукопису до видання: 16.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

Ф. О. ПТАЩЕНКО

доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри вищої математики і фізики
Національний університет «Одеська морська академія»
ORCID: 0000-0002-8203-0494

О. Ю. ПОПОВСЬКИЙ

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри вищої математики і фізики
Національний університет «Одеська морська академія»
ORCID: 0000-0003-0928-4452

А. А. ГОРЮК

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри вищої математики і фізики
Національний університет «Одеська морська академія»

В. П. ЗЕНЧЕНКО

кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри вищої математики і фізики
Національний університет «Одеська морська академія»

В. М. ПОЛОСІНА

старший викладач кафедри вищої математики і фізики
Національний університет «Одеська морська академія»

О. І. ВЕЛИКА

старший викладач кафедри корабельної енергетики
та електроенергетичних систем
Інститут Військово-морських сил
Національного університету «Одеська морська академія»

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЗОНАНСНИХ УМОВ ДЛЯ СИСТЕМ БЕЗДРОТОВОЇ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ В УВЧ-ДІАПАЗОНІ

У роботі виконано чисельне моделювання системи бездротової передачі енергії у діапазоні ультрависоких частот (UHF) між двома кільцевими рамковими антенами, налаштованими на частоту 868 МГц. Такий діапазон широко використовується в технологіях радіочастотної ідентифікації (RFID) у країнах Євросоюзу та Україні, що забезпечує доступність апаратних засобів та дозволяє розглядати бездротове підзарядження малопотужних пристроїв як можливе доповнення до стандартної UHF-інфраструктури. Антени реалізуються на основі друкованої плати та забезпечуються підстроювальними індуктивностями поверхневого монтажу форм-фактору SMD 0805, що робить їх конструктивно простими, дешевими та технологічними для масового виробництва. Основна увага приділена впливу радіусу антен (2.5-6 см) і відстані між ними (1, 2 і 10 см) на коефіцієнт передачі потужності $|S_{21}|^2$, отриманий в рамках електродинамічного моделювання в програмному середовищі COMSOL Multiphysics. Показано, що при малих відстанях між антенами (1-2 см) існують оптимальні радіуси, які забезпечують максимальну передачу енергії (до 60-80%), що пов'язано з оптимальним балансом власної та взаємної індуктивності контурів. Для більшої відстані (10 см) ефективність передавання енергії закономірно знижується, але також спостерігається оптимум в області більших радіусів. Додатково досліджено залежність оптимальної підстроювальної індуктивності L_{OPT} від радіусу антени, що дозволяє визначити діапазон значень (40-110 нГн), сумісний зі стандартними компонентами SMD. Отримані результати демонструють можливість практичної оптимізації параметрів друкованих антен для ближньої бездротової передачі енергії в UHF-діапазоні та підтверджують ефективність чисельного моделювання як інструмент проектування подібних систем.

Ключові слова: бездротова передача енергії, UHF RFID, ефективність, оптимізація, моделювання, метод кінцевих елементів, COMSOL Multiphysics.

F. O. PTASHCHENKO

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Higher Mathematics and Physics
National University "Odesa Maritime Academy"
ORCID: 0000-0002-8203-0494

O. YU. POPOVSKII

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Higher Mathematics and Physics
National University "Odesa Maritime Academy"
ORCID: 0000-0003-0928-4452

A. A. GORYUK

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Higher Mathematics and Physics
National University "Odesa Maritime Academy"

V. P. ZENCHENKO

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor at the Department of Higher Mathematics and Physics
National University "Odesa Maritime Academy"

V. M. POLOSINA

Senior Lecturer at the Department of Physics and Chemistry
National University "Odesa Maritime Academy"

O. I. VELYKA

Senior Lecturer at the Department of Ship Power Engineering
and Electrical Power Systems
Institute of Military-Naval Forces
of National University "Odesa Maritime Academy"

MODELING AND OPTIMIZATION OF RESONANCE CONDITIONS FOR UHF WIRELESS POWER TRANSMISSION SYSTEMS

This paper presents a numerical simulation of a wireless power transmission system in the ultra-high frequency (UHF) range between two ring loop antennas tuned to a frequency of 868 MHz. This range is widely used in radio frequency identification (RFID) technologies in the European Union and Ukraine, ensuring the availability of hardware and allowing wireless charging of low-power devices to be considered as a possible addition to the standard UHF infrastructure. The antennas are implemented on a printed circuit board and equipped with surface-mount trimming inductors of the SMD 0805 form factor, making them simple in design, inexpensive, and technologically feasible for mass production. The main focus is on the influence of the antenna radius (2.5-6 cm) and the distance between them (1, 2, and 10 cm) on the power transfer coefficient $|S_{21}|^2$, obtained through electrodynamic modeling in the COMSOL Multiphysics software environment. It is shown that at small distances between antennas (1-2 cm), there are optimal radii that ensure maximum energy transfer (up to 60-80%), which is due to the optimal balance of the self- and mutual inductance of the circuits. For larger distances (10 cm), the energy transfer efficiency naturally decreases, but an optimum is also observed at larger radii. The dependence of the optimal L_{OPT} trimming inductance on the antenna radius was additionally studied, allowing us to determine a range of values (40-110 nH) compatible with standard SMD components. The obtained results demonstrate the feasibility of practical optimization of printed circuit antenna parameters for short-range wireless power transmission in the UHF range and confirm the effectiveness of numerical simulation as a design tool for such systems.

Key words: wireless power transmission, UHF RFID, efficiency, optimization, modeling, finite element method, COMSOL Multiphysics.

Постановка проблеми

Бездротова передача енергії (Wireless Power Transfer, WPT) стає все більш затребуваною технологією завдяки можливості живлення автономних пристроїв без використання дротів і батарей. Особливо актуальними є такі системи для інтернету речей (IoT), сенсорних вузлів та RFID-міток, де компактність, надійність та мінімальне обслуговування є ключовими вимогами. Частотний діапазон навколо 868 МГц (європейська частина UHF-діапазону RFID) є привабливим вибором для WPT: він широко використовується в стандартах RFID, що забезпечує доступність апаратного забезпечення (включаючи генератори, приймачі та антени), а також легальність експлуатації та

зрілі екосистеми. Такий частотний діапазон дозволяє проектувати антени помірних розмірів (кілька сантиметрів), зберігаючи достатню дальність і ефективність передачі енергії. Крім того, виготовлення приймально-передавальних антен на основі технологій друкованих плат та стандартних компонентів поверхневого монтажу (SMD) є відносно простим та недорогим. Застосування, наприклад, SMD-індуктивностей дозволяє легко вбудувати резонансні контури у стандартні плати, що спрощує прототипування та масштабування. Моделювання для оптимізації таких систем є дуже важливим: без чисельного аналізу неможливо точно визначити оптимальні геометричні параметри (радіус антен, форму, індуктивність), при яких досягається максимальна передача потужності. Оптимізація цих параметрів особливо критична в УВЧ-діапазоні через баланс між магнітною взаємною індуктивністю, втрачаними та недосконалим узгодженням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У літературі вже є ряд робіт, присвячених бездротовій передачі енергії та її поєднанню з RFID-системами, але оптимізація геометрії та параметрів саме UHF-систем залишається недостатньо вивченою. Аналіз гармонік у WPT для пасивних RFID проведено у [1], де розглянуто вплив нелінійних ефектів у пасивних UHF-RFID мітках, що виникають через передачу енергії, у тому числі гармоніки та їх використання для зв'язку. У [2] було обговорено теорію та експериментальні результати, пов'язані з нелінійністю випрямлячів у RFID-системах та їх вплив на енергонасичення. Кількісна оцінка ефективності передачі у UHF-системах на частоті 868 МГц була проведена у [3]. У [4] було проведено моделювання ближньої індуктивної передачі енергії між кільцевими WPT-антенами на частоті 868 МГц у медичних додатках, що демонструє придатність цього діапазону для компактних систем. У роботі [5] було описано сучасні досягнення в індуктивній передачі енергії, включаючи стратегії оптимізації зв'язку, узгодження та управління навантаженням. У роботі [6] представлено системний огляд сучасних систем бездротової передачі енергії – від ближнього до далекого поля, було обговорено виклики в ефективності, регулюванні та інтеграції. У [7] було розглянуто оптимізацію WPT-систем з індуктивним зв'язком, включаючи S-параметри та моделювання навантаження. У [8] було проведено дослідження дизайну UHF RFID антен на частоті 868 МГц, які можна було б застосовувати для мініатюрних пристроїв. Незважаючи на ці досягнення, оптимізація залежності передачі потужності від геометричного розміру антен (радіуса) та резонансної індуктивності в рамках UHF WPT-систем залишається недостатньо освітленою. Зокрема, мало робіт, що систематично варіюють радіус рамкових антен і підстроювальну індуктивність разом з відстанню між елементами для максимізації $|S_{21}|^2$.

Формулювання мети дослідження

При проведенні досліджень та аналізі їх результатів було поставлено наступні цілі:

- Виконати систематичне чисельне дослідження впливу радіуса кільцевих антен на коефіцієнт передачі енергії $|S_{21}|^2$ в системі WPT на частоті 868 МГц за різних відстаней між антенами (1 см, 2 см і 10 см).
- Визначити оптимальні значення радіусу антен та підстроювальної індуктивності L_{opt} , при яких досягається максимальна ефективність передачі для кожної з розглянутих відстаней.
- Проаналізувати, як зміна геометрії (радіусу) кільцевої антени впливає на необхідну підстроювальну індуктивність, необхідну для резонансного налаштування.
- Оцінити можливість практичної реалізації знайдених оптимальних параметрів з точки зору використання стандартних SMD-індуктивностей та друкованої технології.
- Запропонувати рекомендації для проектування компактних UHF WPT/RFID систем, що ґрунтуються на оптимізованих параметрах антен та їх узгодження.

Викладення основного матеріалу дослідження

Теоретичні основи моделювання. Моделювання електромагнітної взаємодії антен засноване на вирішенні системи рівнянь Максвелла в гармонічному (монохроматичному) наближенні. У припущенні синусоїдальної часової залежності всіх величин вигляду $\exp(j\omega t)$, диференціальні рівняння Максвелла зводяться до частотної форми, що містить комплексні електричні і магнітні поля $E(\omega)$ і $H(\omega)$. Ці рівняння утворюють замкнену систему, що зв'язує поля зі струмами, зарядами та властивостями матеріалів, і є фундаментом методу кінцевих елементів, реалізованого в COMSOL Multiphysics. Детальний опис використаних рівнянь хвильового типу, а також обговорення комплексних амплітуд, операторної форми та граничних умов наведено в роботі [9]. Тут відзначимо лише, що електромагнітна задача розв'язується в стаціонарному частотному формулюванні, що дозволяє обчислювати розподіли E , H , щільності потоку енергії і S-параметри при заданій частоті збудження. Таке наближення є повністю коректним для дослідження резонансних властивостей антен на фіксованій частоті (868 МГц) та їх енергетичного зв'язку за різних геометричних параметрів.

Для кількісного аналізу взаємодії двох рамкових антен у частотній області широко використовується формалізм S-параметрів (scattering parameters), який описує розподіл падаючих та відбитих хвиль у багатопортових високочастотних системах. У цій роботі використовується двопортова модель: перший порт збуджує передавальну антену, а другий реєструє сигнал, прийнятий другою антеною. Коефіцієнт відбиття S_{11} характеризує узгодження передавальної антени з джерелом сигналу. Коли $|S_{11}| \rightarrow 0$, відбиття потужності в передавальній антені буде

мінімальним, а введення потужності в антену буде найбільш ефективним; значення $|S_{11}| \approx 1$ вказують на суттєві неузгодження та низьку ефективність збудження. Коефіцієнт передачі S_{21} відображає здатність системи переносити електромагнітну енергію від передаючої до приймальної антени. Оскільки S_{11} та S_{21} є комплексними величинами, що містять як амплітуду, так і фазу, для енергетичного трактування використовується квадрат модуля коефіцієнта передачі:

$$|S_{21}|^2 = \frac{P_{\text{прийн}}}{P_{\text{підвед}}}, \quad (1)$$

де $P_{\text{підвед}}$ – потужність, що підводиться до передавальної антени, а $P_{\text{прийн}}$ – потужність, що надходить на вхід приймальної антени. Ця величина інтерпретується як частка переданої потужності, що робить її прямим показником ефективності бездротової передачі енергії. Саме тому в подальшому аналізі використовується модуль $|S_{21}|^2$: він дозволяє наочно порівнювати ефективність різних геометричних конфігурацій, відстаней між антенами та значень підстроювальної індуктивності, а також виявляти області параметрів, що забезпечують резонансну максимізацію енергетичного зв'язку.

Деталі моделювання. Моделювання бездротової передачі енергії було проведено у програмному середовищі COMSOL Multiphysics 6.2 з використанням модуля RF / Electromagnetic Waves, Frequency Domain, що дозволяє розв'язувати хвильові рівняння, отримані з системи рівнянь Максвелла в гармонічному наближенні.

Геометрія моделі представлена на рис. 1а. Система складається з двох кільцевих рамкових антен, розташованих коаксialно у вільному просторі на відстані (d), яке варіюється від 1 до 10 см. Антени реалізовані у вигляді мідних доріжок шириною 3 мм, сформованих на діелектричній підкладці товщиною 2 мм з політетрафторетилену (PTFE) з відносною діелектричною проникністю $\epsilon_r = 2.1$. Оскільки товщина мідного шару (35 мкм) значно перевищує глибину скін-шару на частоті 868 МГц (близько 2.1 мкм), провідники моделювалися як ідеальний провідник (PEC), що знижувало обчислювальну складність без втрати точності. Кожна антена містила два розриви. У першому була змонтована підстроювальна індуктивність SMD-типу з форм-фактором 0805 – вона моделювалася як зосереджений елемент з індуктивністю (L). Значення індуктивності вибиралося таким, щоб забезпечити резонанс системи частоті 868 МГц при обраному радіусі антени. У другій точці розриву був розміщений зосереджений порт (lumped port) з хвильовим імпедансом $z = 50$ Ом. В першій антені порт служив джерелом збудження (1 В), другий використовується для вимірювання сигналу, що приймається, і розрахунку S -параметрів. Зовнішній простір навколо антен обмежено сферичною областю, на зовнішню поверхню якої нанесений поглинаючий шар PML (Perfectly Matched Layer) завтовшки не менше чверті довжини хвилі. Його завдання – запобігати відбиттю електромагнітної хвилі від меж моделі та імітувати умови випромінювання в нескінченний вільний простір. Розміри повітряної області вибиралися так, щоб відстань між PML і антенами була не меншою, ніж 0.5λ .

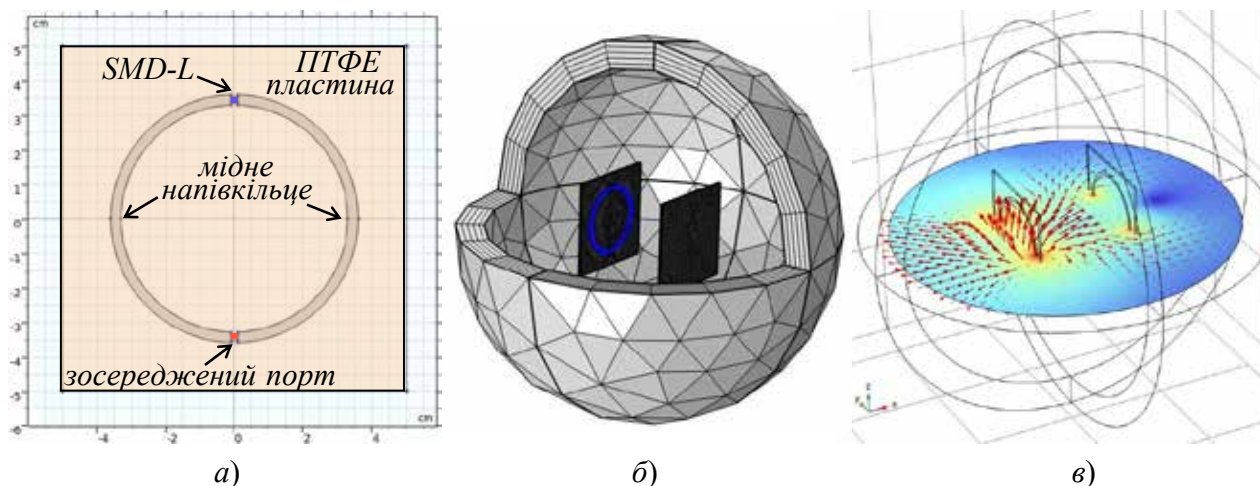


Рис. 1. а) – Схематичне зображення приймальної (передавальної) антени; б) – модельна область із розбиттям на кінцево-елементну сітку; в) – розподіл модуля середнього електричного поля у логарифмічному масштабі, стрілками показані напрямки векторів середнього за часом потоку енергії

Сітка кінцевих елементів представлена на рис. 1б. В областях, що прилягала до кільцевих антен та зосереджених елементів або портів, використовувалося локальне згущення сітки, що забезпечувало не менше 8-10 елементів на мінімальну довжину хвилі в матеріалі. Усередині PTFE-підкладки виконувалася додаткова адаптивна генерація, спрямована на коректне відтворення розподілу поля поблизу меж провідних елементів. Середня кількість

ступенів свободи у розрахунках становила $1.5 \cdot 10^6 - 3 \cdot 10^6$, що забезпечувало стійке і відтворюване рішення у всьому досліджуваному діапазоні параметрів.

Результати та обговорення. На рис. 1в показано розподіл амплітуди електричного поля $20 \log_{10}|E|$ у площині симетрії антен, а також векторний графік середнього потоку енергії (вектору Пойнтінга) $\vec{S} = \frac{1}{2} \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*)$. Видно, що поле локалізовано поблизу кільцевих провідників і утворює характерну для зв'язаних резонаторів інтерференційну картину, а потік енергії направлений від передавальної антени до приймальної системи. За приймальною антеною можна бачити «тінь», яка свідчить, що значна частина енергії була поглинена приймачем. Ця візуалізація служить якісним підтвердженням коректного налаштування резонансного зв'язку і демонструє механізм передачі енергії у досліджуваній конфігурації системи.

На рис. 2а представлені розраховані залежності коефіцієнта передачі енергії $|S_{21}|^2$ від радіусу кільцевих антен r в діапазоні 2.5–6 см для трьох робочих відстаней між передавальною і приймальною антенами – 1 см, 2 см і 10 см. Як видно з графіка, потужність, що передається, істотно залежить як від геометричних параметрів антен, так і від відстані між ними. Для малих відстаней (1–2 см) спостерігається виражений максимум при радіусах близько 3.5–4.0 см. У цій області геометрична індуктивність контуру та взаємна індуктивність між антенами забезпечують оптимальне узгодження резонансних контурів при робочій частоті 868 МГц. Максимальні значення коефіцієнта передачі потужності досягають 0.8 при ($d=1$ см) та 0.6 при ($d=2$ см), що відповідає досить високій ефективності ближньої передачі енергії в УВЧ-діапазоні. При збільшенні відстані до 10 см значення $|S_{21}|^2$ зменшуються на порядок, що відповідає очікуваному зниженню коефіцієнта магнітного зв'язку між антенами. Однак навіть у цьому випадку спостерігається невеликий максимум в області $r \sim 4.5$ см, що свідчить про існування оптимального розміру контуру, при якому взаємна індуктивність залишається достатньою, щоб компенсувати втрати узгодження на далеких відстанях.

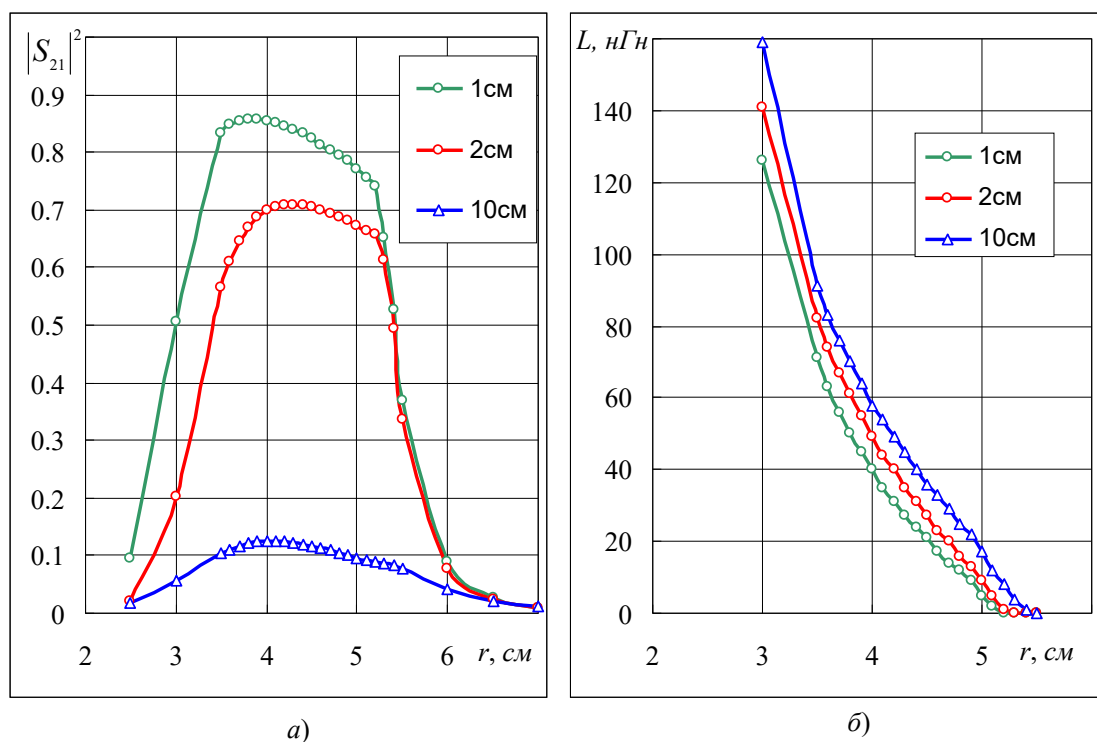


Рис. 2. Розраховані залежності коефіцієнта передачі енергії $|S_{21}|^2$ (а) та оптимальної підстроювальної індуктивності L_{OPT} (б) від радіусу r кільцевих антен для трьох відстаней між передавачем та приймачем – 1 см, 2 см та 10 см

На рис. 2б показана залежність оптимальної підстроювальної індуктивності L_{OPT} (яка забезпечує максимальне значення $|S_{21}|^2$) від радіусу антен. Для всіх трьох досліджених відстаней криві $L_{OPT}(r)$ демонструють монотонне зростання, що узгоджується з фізичною природою резонансного контуру: збільшення радіуса призводить до зростання індуктивності кільця і зниження його резонансної частоти, тому для відновлення резонансу на частоті 868 МГц потрібно збільшення величини підстроювальної індуктивності. При малих відстанях (1–2 см) оптимальна індуктивність змінюється в межах 40–110 нГн, що повністю відповідає доступним компонентам поверхневого монтажу (SMD-індуктивності типорозміру 0805). Це підтверджує можливість практичної реалізації

оптимізованих антен на основі стандартної технології друкованих плат. Для $d = 10$ см спостерігається більш різке зростання L_{OPT} , що пов'язано зі зменшенням взаємного впливу антен та ослабленням їхньої резонансної взаємодії.

Аналіз графіків рис. 2а та 2б показує, що оптимізація розмірів антен та підстроювальної індуктивності є ключовим фактором досягнення ефективної бездротової передачі енергії в УВЧ-діапазоні. При цьому важливу роль відіграють два фактори. Перший – геометрична настройка резонансу, що визначається радіусом антени та її власною індуктивністю. Другий – взаємна індуктивність, що залежить від відстані між антенами та визначає величину коефіцієнта зв'язку. У сукупності ці два фактори визначають форму кривих $|S_{21}|^2(r)$ і $L_{OPT}(r)$. Особливості поведінки кривих повністю узгоджуються з класичною теорією двох зв'язаних резонансних контурів і демонструють, що частотний діапазон 868 МГц залишається робочим навіть за суттєвих змін геометрії антен, що важливо для оптимізації систем WPT ближньої дії.

Висновки

У роботі проведено кінцево-елементне моделювання системи бездротової передачі енергії в діапазоні ультра-високих частот між двома кільцевими рамковими антенами, забезпеченими підстроювальними індуктивностями. На основі розрахунків встановлено, що ефективність передачі енергії визначається спільним впливом геометрії антен та відстані між ними, а також точністю налаштування резонансних властивостей системи.

Показано, що для малих відстаней між антенами (1-2 см) існує область оптимальних радіусів антен (порядку 3.5-4 см), за яких коефіцієнт передачі потужності $|S_{21}|^2$ досягає максимальних значень – до 60-80% при частоті 868 МГц. Для кожного радіусу визначається певне значення підстроювальної індуктивності L_{OPT} , необхідне забезпечення резонансу. Залежність оптимальної індуктивності від радіусу антени $L_{OPT}(r)$ має монотонний характер і лежить у технологічно доступному діапазоні 40-110 нГн, що підтверджує можливість реалізації таких пристроїв на основі стандартних SMD-компонентів.

Для збільшених відстаней (до 10 см) рівень зв'язку закономірно знижується внаслідок зменшення взаємної індуктивності, проте резонансний характер залежності $|S_{21}|^2(r)$ зберігається, що вказує на можливість часткової геометричної компенсації ослабленого зв'язку. Це підкреслює важливість комплексної оптимізації параметрів антен, що включає вибір радіусу, відстані та підстроювальної індуктивності.

Отримані результати підтверджують, що запропонована методика моделювання є ефективним інструментом для аналізу та оптимізації бездротових систем передачі енергії ближньої дії в UHF-діапазоні. Чисельний підхід дозволяє цілеспрямовано підбирати параметри антен для досягнення необхідної ефективності, а також є основою подальших досліджень та інженерного проектування пристроїв даного класу.

Список використаної літератури

1. Andia Vera, M.; Duroc, Y.; Tedjini, S. Analysis and exploitation of harmonics in wireless power transfer: Passive UHF RFID case. *Wireless Power Transfer*, 1(2), 69–76 (2014). <https://doi.org/10.1017/wpt.2014.8>
2. Andia-Vera, M.; Duroc, Y.; Tedjini, S. Theory and experiment concerning the exploitation of rectification nonlinearity in wireless power transfer: The passive UHF RFID case. *Wireless Power Transfer*, 3(1), 3–12 (2016). <https://doi.org/10.1017/wpt.2016.1>
3. de Souza, R. M.; Tavares, T.; Carvalho, N. B. UHF RFID power transfer efficiency analysis for 868 MHz systems. *Electronics Letters*, 51(14), 1082–1084 (2015). <https://doi.org/10.1049/el.2015.0654>
4. Mehta, R., Dey, S., Dey, N. Near-field inductive wireless power transfer at ISM bands for biomedical applications. (2022). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29488.51209>
5. Khalid, H.; Farooq, U.; Naeem, M.; et al. Recent trends in inductive wireless power transfer systems: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 58, 103464 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103464>
6. Van Mulders, J., Famaey, J., Lannoo, B., et al. Wireless power transfer: A review. *Sensors*, 22(15), 5573 (2022). <https://doi.org/10.3390/s22155573>
7. Degen, M.; Kuster, N.; van de Burgwal, A.; et al. Analysis of inductively coupled resonant WPT systems for improved efficiency. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2021, 94 (2021). <https://doi.org/10.1186/s13638-021-01994-4>
8. Dubok, A.; Smolders, A. B. Design and analysis of compact UHF RFID antennas for 868 MHz applications. (*Технічний звіт Eindhoven University of Technology*, 2014). <https://doi.org/10.6100/IR779026>
9. Птащенко Ф.О., Поповський О.Ю., Горюк А.А., Зенченко В.П., Полосіна В.М. (2025). Деякі аспекти моделювання втрат у осерді трансформатора за допомогою програмного модуля AC/DC Comsol Multiphysics. *Наука і техніка сьогодні (серія «Техніка»)* – 2024. № 13(41) 2024. С. 1214-1226. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13\(41\)-1214-1226](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13(41)-1214-1226)

References

1. Andia Vera, M.; Duroc, Y.; Tedjini, S. Analysis and exploitation of harmonics in wireless power transfer: Passive UHF RFID case. *Wireless Power Transfer*, 1(2), 69–76 (2014). <https://doi.org/10.1017/wpt.2014.8>

2. Andia-Vera, M.; Duroc, Y.; Tedjini, S. Theory and experiment concerning the exploitation of rectification nonlinearity in wireless power transfer: The passive UHF RFID case. *Wireless Power Transfer*, 3(1), 3–12 (2016). <https://doi.org/10.1017/wpt.2016.1>
3. de Souza, R. M.; Tavares, T.; Carvalho, N. B. UHF RFID power transfer efficiency analysis for 868 MHz systems. *Electronics Letters*, 51(14), 1082–1084 (2015). <https://doi.org/10.1049/el.2015.0654>
4. Mehta, R., Dey, S., Dey, N. Near-field inductive wireless power transfer at ISM bands for biomedical applications. (2022). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29488.51209>
5. Khalid, H.; Farooq, U.; Naeem, M.; et al. Recent trends in inductive wireless power transfer systems: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 58, 103464 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103464>
6. Van Mulders, J., Famaey, J., Lannoo, B., et al. Wireless power transfer: A review. *Sensors*, 22(15), 5573 (2022). <https://doi.org/10.3390/s22155573>
7. Degen, M.; Kuster, N.; van de Burgwal, A.; et al. Analysis of inductively coupled resonant WPT systems for improved efficiency. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2021, 94 (2021). <https://doi.org/10.1186/s13638-021-01994-4>
8. Dubok, A.; Smolders, A. B. Design and analysis of compact UHF RFID antennas for 868 MHz applications. (Technical report Eindhoven University of Technology, 2014). <https://doi.org/10.6100/IR779026>
9. Ptashchenko F.O., Popovskii O.Yu., Goruyk A.A., Zenchenko V.P., Polosina V.M. (2024). Dejaki aspekty modeluvannya vtrat u oserdy transformatora za dopomogoyu programnogo modulja AC/DC Comsol Multyphysics [Some aspects of modeling losses in the transformer core using the Comsol Multyphysics AC/DC software module]. *Nauka I tekhnika siogodni (serija «Tekhnika»)* – Science and Technology Today (Technology Series) – 2024. № 13(41) 2024. C. 1214-1226 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13\(41\)-1214-1226](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13(41)-1214-1226)

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 14.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

А. В. РЕМІНЬ

аспірант кафедри «Підйомно-транспортні машини
та інжиніринг портового технологічного обладнання»
Одеський національний морський університет
ORCID: 0009-0009-7922-6371

П. О. СЕМЕНОВ

кандидат технічних наук,
доцент кафедри «Підйомно-транспортні машини
та інжиніринг портового технологічного обладнання»
Одеський національний морський університет
ORCID: 0000-0003-4121-6011

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПІДШИПНИКІВ ПРИВОДУ МЕХАНІЗМУ ПІДЙОМУ ПРИЧАЛЬНОГО КОНТЕЙНЕРНОГО ПЕРЕВАНТАЖУВАЧА

У сучасних умовах більшість вантажно-розвантажувальних операцій, пов'язаних із контейнерними перевезеннями, здійснюється із застосуванням причальних контейнерних перевантажувачів. Забезпечення їхньої безперебійної та ефективної роботи потребує підтримання високого рівня технічної справності основного обладнання. Підвищені вимоги до надійності експлуатації перевантажувальних механізмів у портових комплексах зумовлюють необхідність розроблення та впровадження нових, більш досконалих методів технічної діагностики в процесі їх функціонування.

Оцінити фактичний технічний стан перевантажувача лише теоретичними методами практично неможливо через постійні зміни навантажень та динамічні режими роботи обладнання. Тому підвищення експлуатаційної надійності контейнерних перевантажувачів досягається шляхом розроблення ефективних методів контролю та діагностики стану окремих елементів їх конструкції.

До пріоритетних завдань цього напрямку належить своєчасне визначення технічного стану механізму підйому вантажу, оскільки наявність прихованих дефектів його складових може призвести до виникнення аварійних ситуацій, виходу обладнання з ладу та значних простоїв виробничого процесу. Діагностика в цьому контексті дає змогу виявляти несправності механізмів без необхідності їх демонтажу або розбирання, що суттєво скорочує час технічного обслуговування.

На сьогодні розроблено низку методів контролю технічного стану підшипникових вузлів обертальних механізмів [1–7]. Однак, попри значні досягнення у цій сфері, зазначені методи часто характеризуються високою складністю реалізації, обмеженою сферою застосування та наявністю певних технічних і експлуатаційних обмежень. У зв'язку з цим питання удосконалення системи діагностики підшипникових вузлів контейнерних перевантажувачів залишається актуальним науково-технічним завданням.

Методи вібродіагностики, що застосовуються у сучасних дослідженнях, забезпечують проведення комплексного статистичного аналізу на основі періодичних і квазіперіодичних випадкових процесів. Такий підхід передбачає виділення модулюючих стаціонарних компонентів і подальший спектрально-кореляційний аналіз їх параметрів, що дозволяє отримати інформацію про характер і ступінь розвитку дефектів. Діагностичні ознаки формуються з використанням імовірнісних характеристик першого та другого порядків; при цьому саме аналіз параметрів другого порядку дає можливість виявляти дефекти на ранніх стадіях їх виникнення [2–6].

Ключові слова: причальний контейнерний перевантажувач, механізм підйому, вібродіагностика, дослідження технічного стану, метод вібродіагностики, фактичний технічний стан.

A. V. REMIN

Postgraduate Student at the Department of Hoisting and Transport Machines
and Engineering of Port Technological Equipment
Odesa National Maritime University.
ORCID: 0009-0009-7922-6371

P. O. SEMENOV

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Hoisting and Transport Machines
and Engineering of Port Technological Equipment
Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0003-4121-6011

RESEARCH ON THE TECHNICAL CONDITION OF THE DRIVE BEARINGS OF THE QUAY CONTAINER HANDLER LIFTING MECHANISM

Under modern conditions, most cargo handling operations related to container transportation are carried out using quay container handlers. Ensuring their uninterrupted and efficient operation requires maintaining a high level of technical reliability of the main equipment. Increased requirements for the operational reliability of handling mechanisms in port complexes necessitate the development and implementation of new, more advanced methods of technical diagnostics during their operation.

Assessing the actual technical condition of a container handler solely by theoretical methods is practically impossible due to constantly changing loads and the dynamic operating modes of the equipment. Therefore, improving the operational reliability of container handlers is achieved through the development of effective methods for monitoring and diagnosing the condition of individual components of their structure.

A priority task in this area is the timely determination of the technical condition of the lifting mechanism, since the presence of hidden defects in its components can lead to emergency situations, equipment failures, and significant production downtime. In this context, diagnostics allow the detection of mechanism faults without the need for dismantling or disassembly, which significantly reduces maintenance time.

Currently, a number of methods for monitoring the technical condition of bearing assemblies in rotary mechanisms have been developed [1–7]. However, despite significant achievements in this field, these methods are often characterized by high implementation complexity, limited scope of application, and certain technical and operational restrictions. Therefore, improving the diagnostic system for the bearing assemblies of container handlers remains a relevant scientific and technical challenge.

Vibration diagnostic methods used in modern studies enable comprehensive statistical analysis based on periodic and quasi-periodic random processes. This approach involves isolating modulating stationary components and performing subsequent spectral-correlation analysis of their parameters, which provides information about the nature and degree of defect development. Diagnostic features are formed using first- and second-order probabilistic characteristics; in particular, the analysis of second-order parameters allows the detection of defects at the early stages of their occurrence [2–6].

Key words: quay container handler, lifting mechanism, vibration diagnostics, technical condition assessment, vibration diagnostic method, actual technical condition.

Постановка проблеми

У сучасних умовах більшість операцій з вантаження та розвантаження контейнерів виконується із використанням причальних контейнерних перевантажувачів. Визначення їх фактичного технічного стану лише за допомогою теоретичних підходів є практично неможливим, оскільки обладнання працює в умовах змінних навантажень і динамічних режимів. Тому підвищення експлуатаційної надійності контейнерних перевантажувачів слід забезпечувати шляхом розроблення дієвих методів контролю та діагностики технічного стану окремих конструктивних елементів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вивчення технічного стану підшипників приводного механізму підйому причального контейнерного перевантажувача ґрунтується на сучасних методах вібродіагностики, статистичного аналізу вібраційних сигналів та застосуванні стохастичних моделей. Огляд останніх джерел дозволяє виділити ключові напрями досліджень, досягнення та обмеження існуючих підходів.

Стохастичні методи аналізу коливань

Яворський І.М. у фундаментальній праці «Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань» розробив теоретичні основи стохастичного моделювання коливальних процесів у механічних системах. Ця робота підкреслює важливість використання моделей випадкових процесів для опису динаміки вузлів з непостійними навантаженнями та складною взаємодією елементів. Особливо це стосується великих обертових механізмів, таких як приводи підйому контейнерних кранів, де навантаження та вібрації є непередбачуваними і змінюються у часі.

Статистичний та векторно-тензорний аналіз

Дослідження Мацька, Яворського, Юзефовича та Семенова (2018) «Статистичний векторно-тензорний аналіз вібрацій центрифуги з розвинутим дефектом обертового вузла» демонструє приклад застосування статистичних методів до виявлення дефектів у складних обертових системах. Автори застосували векторно-тензорний аналіз для обробки тривимірних вібраційних сигналів, що дозволяє виділяти закономірності та моделювати вплив

дефектів на динаміку вузла. Даний підхід забезпечує високу чутливість до змін стану підшипника навіть на ранніх стадіях розвитку дефекту, що є критично важливим для підйомних механізмів контейнерних перевантажувачів.

Коваріаційні інваріанти та періодично-корельовані процеси

У роботі Яворського, Мацько, Трохима та Семенова (2020) «The coherent and component estimation of covariance invariants for vectorial periodically correlated random processes and its application» пропонується метод оцінки коваріаційних інваріантів для векторних періодично-корельованих випадкових процесів. Такий підхід дозволяє ефективно виділяти інформацію про дефекти у складних механізмах без необхідності розбирання вузлів. Використання коваріаційних інваріантів робить можливим аналіз змішаних сигналів, що містять як періодичні, так і випадкові компоненти, що відповідає реальним умовам роботи приводного механізму підйому контейнерного крана, де сигнал вібрації є надзвичайно динамічним.

Формулювання теми дослідження

Метою статті є оцінка методу вібродіагностики на причальному контейнерному перевантажувачі, який перевантажує контейнери з судна безпосередньо на тягач, що знаходиться у порталі ПКП. Механізм підйому даної вантажопідйомної машини представлений двома двигунами, двома муфтами, двома барабанами та редуктором.

Викладення основного матеріалу дослідження

Було здійснено вимірювання та запис сигналів вібрації підшипникових вузлів механізму підйому вантажу причального контейнерного перевантажувача «ЗРМС». Схему розташування контрольних точок приводу механізму подано на рис. 1.

Точки контролю для реєстрації вібраційних сигналів обрано на корпусі підшипникових вузлів (рис. 1). У кожній із них проводився запис сигналів вібрації під час роботи механізму як на підйом, так і на опускання спредера. Для цього використовувалися давачі віброприскорення ДВЗ-70. Частота дискретизації сигналів вібрації була сталою для всіх підшипникових вузлів і становила 10 кГц, а тривалість одного запису – 5 с.

Варто зазначити, що під час проведення вимірювань давачі кріпилися до корпусу механізму за допомогою магнітних основ, що може спричиняти додаткову похибку у визначенні абсолютних значень вібрацій.

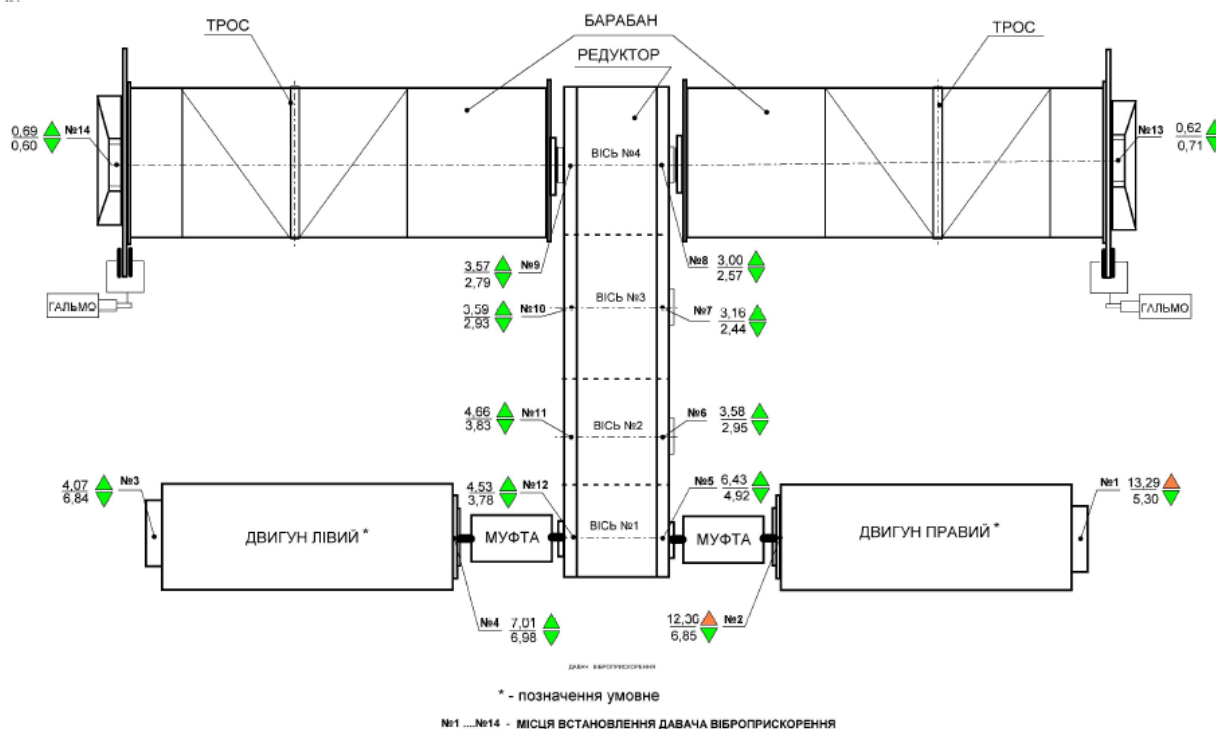


Рис. 1. Схема розташування точок контролю та виміряне значення СКЗ віброприскорення (м/с²) приводу механізму підйому контейнерного перевантажувача.

Для оцінювання технічного стану підшипникових вузлів механізму було застосовано такі методи: визначення середньоквадратичних значень (СКЗ) віброприскорення, аналіз співвідношення сигнал/шум, кореляційний аналіз вібраційних сигналів, спектральний та нестационарний аналіз стохастичних складових вібрацій. Показники СКЗ віброприскорення (у мм/с²) дають змогу визначити рівень вібрацій підшипникового вузла відповідно до встановлених нормативів.

На основі сигналів віброприскорення отримано реалізації сигналів віброприскорення та для кожного з сигналів визначено середньоквадратичне значення (СКЗ) сигналу.

Для даної роботи буде розглянуто 2 підшипникових вузла, а саме перший та третій.

Середньоквадратичні значення (СКЗ) вібраційного сигналу, зафіксованого на контрольних точках приводу механізму, визначали відповідно до стандартів ISO 10816-1:2007 та ISO 2372 і представлені в таблиці 1. Сигнали та їх перетворення були записані на правому електродвигуні.

Підшипниковий вузол № 1:

графіки кореляційних функцій для кожної складової вібрації в стаціонарному наближенні наведено на рис. 2, а спектральні густини потужності – на рис. 3. Аналіз спектру вібраційного сигналу (рис. 3) показав наявність інтенсивної гармонічної складової на частоті 3300 Гц, яка відповідає понад 90 % потужності сигналу, що свідчить про початкову стадію зносу елементів підшипника.

Додатково виконано нестационарний аналіз вібраційного сигналу. Сигнал було розділено на детерміновану та стохастичну складові. У стохастичній складовій виявлення модуляцій основних гармонічних складових стаціонарними випадковими процесами не спостерігалось.

Таблиця 1

Результати вимірювань

№ точки	Найменування вузла	Фактичне значення СКЗ, м/с ²		Граничне значення СКЗ
		при підйомі	при опусканні	
1	Електродвигун правий	13,29	5,3	11,1
2	-//-	12,36	6,85	11,1
3	Електродвигун лівий	7,01	6,98	11,1
4	-//-	4,07	6,84	11,1
5	Редуктор	6,43	4,92	11,1
6	-//-	3,58	2,95	11,1
7	-//-	3,16	2,44	11,1
8	-//-	3,00	2,57	11,1
9	-//-	3,57	2,79	11,1
10	-//-	3,59	2,93	11,1
11	-//-	4,66	3,83	11,1
12	-//-	4,53	3,78	11,1
13	Виносна опора правого барабану	0,62	0,71	11,1
14	Виносна опора лівого барабану	0,69	0,60	11,1

Аналіз дисперсії стохастичної складової показав, що відношення мінімального значення дисперсії за період до максимального становить 0,42. Зі схеми на рис 4 видно, що дисперсія має викид у певному періоді. Серед значущих компонентів дисперсії (рис. 5) виділяється нульовий компонент.

Стан підшипникового вузла № 1 незадовільний.

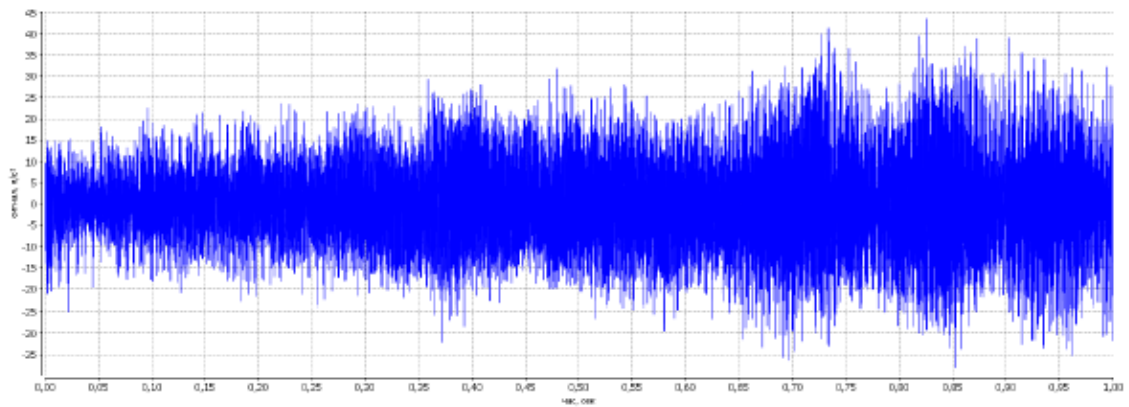
Підшипниковий вузол № 3:

Графіки оцінок кореляційних функцій в стаціонарному наближенні кожної зі складових вібрації та оцінки їх спектральних густин потужності показані на рис. 6.

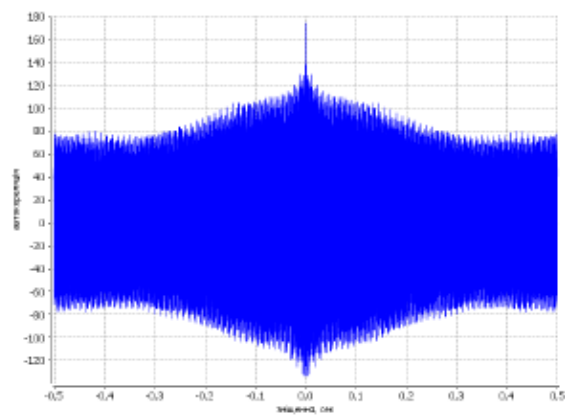
У стохастичній складовій вібраційних сигналів модуляцій стаціонарними випадковими процесами основних гармонічних складових не виявлено. Стан підшипникового вузла № 3 задовільний.

Висновки

Визначено, що метод вібродіагностики на причальному контейнерному перевантажувачі, який перевантажує контейнери з судна безпосередньо на тягач, що знаходиться у порталі ПКП, є надзвичайно дієвим. З розглянутих в роботі підшипникових вузлів було встановлено, що підшипниковий вузол № 1 правого електродвигуна має сильно підвищений рівень вібрації при роботі на підйом, що свідчить про наявність початкової стадії зносу елементів підшипників.

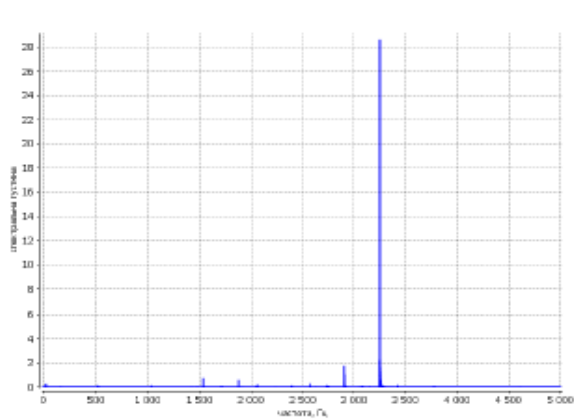


(а)

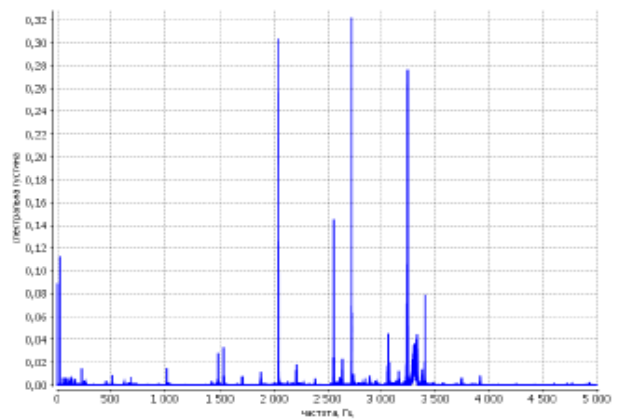


(б)

Рис. 2. Сигнал (а), кореляційна функція (б) в точці № 1



а)



б)

Рис. 3. спектральна густина потужності складових вібрації в точці № 1 при підйомі (а) та опусканні (б) вантажу

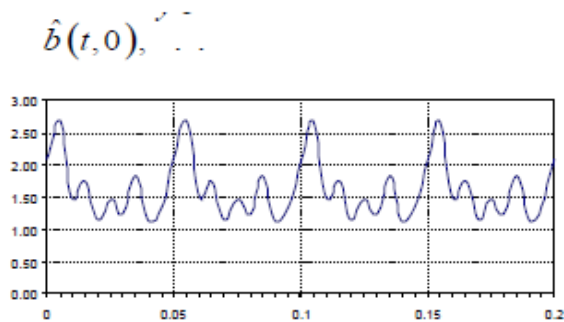


Рис. 4. Дисперсія стохастичної складової сигналу

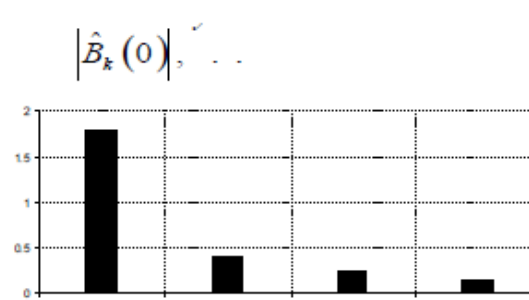
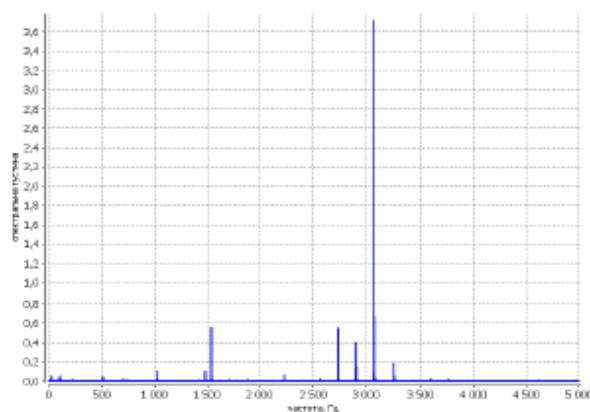
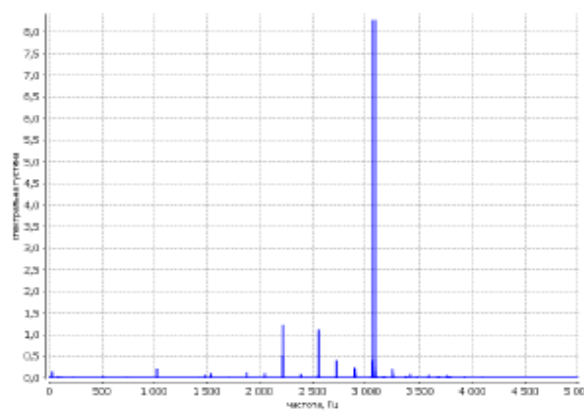


Рис. 5. Компоненти дисперсії стохастичної складової сигналу



а)



б)

Рис. 6. Сигнал, кореляційна функція та спектральна густина потужності складових вібрацій в точці № 3 при підйомі (а) та опусканні (б) вантажу

Список використаної літератури

1. Яворський І. М. Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань / під заг. ред. акад. НАН України З. Т. Назарчука. Львів: ФМІ НАНУ, 2013. с. 804.
2. Мацько І. Й., Яворський І. М., Юзефович Р. М., Семенов П. О. Статистичний векторно-тензорний аналіз вібрацій центрифуги з розвинутим дефектом обертового вузла. Фізично-хімічна механіка матеріалів. № 2. 2018. Т. 54. с. 140–147.
3. Юзефович Р. М., Яворський І. М., Мацько І. Й., Семенов П. О. Визначення покомпонентної функції когерентності взаємозв'язаних періодично нестаціонарних випадкових сигналів. Відбір і обробка інформації. Вип. 44. 2016. с. 17–28.

References

1. Yavorskyi, I. M. (2013). Mathematical models and analysis of stochastic oscillations (Z. T. Nazarchuk, Ed.) [Mathematical Models and Analysis of Stochastic Oscillations]. Lviv: FMI NAS of Ukraine. (in Ukrainian).
2. Matsko, I. Y., Yavorskyi, I. M., Yuzefovych, R. M., & Semenov, P. O. (2018). Statistical vector-tensor analysis of vibrations of a centrifuge with a developed defect of the rotating unit. Physico-Chemical Mechanics of Materials [Statistical Vector-Tensor Analysis of Centrifuge Vibrations with an Advanced Rotating Assembly Defect. Physical-Chemical Mechanics of Materials], 54(2), 140–147. (in Ukrainian).
3. Yuzefovych, R. M., Yavorskyi, I. M., Matsko, I. Y., & Semenov, P. O. (2016). Determination of the component-wise coherence function of interrelated periodically non-stationary random signals. Selection and Processing of Information [Determination of the Componentwise Coherence Function of Interrelated Periodically Non-Stationary Random Signals. Information Selection and Processing], 44, 17–28. (in Ukrainian).

Дата першого надходження рукопису до видання: 30.11.2025
 Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025
 Дата публікації: 31.12.2025

І. М. РИБАЛКО

доктор технічних наук, доцент,
доцент кафедри сервісної інженерії та технології матеріалів
в машинобудуванні імені О. І. Сідашенка
Державний біотехнологічний університет
ORCID: 0000-0002-3663-019X

А. В. ЗАХАРОВ

доктор філософії (PhD) з матеріалознавства
Харківський державний професійно-педагогічний фаховий коледж
імені В. І. Вернадського
ORCID: 0000-0001-9894-7355

О. В. ТІХОНОВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри сервісної інженерії та технології матеріалів
в машинобудуванні імені О. І. Сідашенка
Державний біотехнологічний університет
ORCID: 0000-0001-7209-8375

ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ГРУНТООБРОБНОЇ ТЕХНІКИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ З КОМПЛЕКСНИМ МОДИФІКУВАННЯМ ПОКРИТТІВ

У статті розглянуто комплексний підхід до підвищення експлуатаційної стійкості робочих органів ґрунтообробної техніки, які працюють в умовах інтенсивного абразивного та ударно-абразивного зношування. Об'єктом дослідження є леміші плугів і стрілчасті лапи культиваторів, відновлені методом електрошлакового наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі з формуванням товстих наплавлених шарів та застосуванням порошкових дротів, шихта яких містить комплексні модифікуючі присадки на основі карбідів хрому, карбіду ніобію та оксиду алюмінію. Дослідження побудовано у вигляді замкненої схеми «структура – мікротвердість – зносостійкість – ресурс – економічна ефективність», що дозволяє простежити повний ланцюг перетворень від мікрорівня до практичних техніко-економічних результатів. Описано конструкцію та принцип дії струмопідвідного кристалізатора, подано технологічну схему процесу електрошлакового наплавлення робочих органів та обґрунтовано вибір товщини наплавлених шарів з урахуванням умов їх роботи в ґрунті. На основі структурних, електронно-мікроскопічних і оптико-математичних досліджень показано, що використання комплексно модифікованих порошкових дротів забезпечує перехід від крупнозернистої мартенситної матриці з локальними скупченнями грубих карбідів до дрібнозернистої структури з рівномірно розвинутим дисперсним карбідним каркасом. За даними карт розподілу твердості й мікротвердості встановлено, що комплексне модифікування Cr-карбідами, NbC та Al_2O_3 підвищує твердість приповерхневих зон на 15–20 % порівняно з немодифікованими покриттями, при цьому градієнт твердості по товщині шару зменшується, що свідчить про кращу деформаційну сумісність покриття з основним металом. Результати лабораторних випробувань на ковзне абразивне зношування узагальнено у вигляді діаграми «твердість – зносостійкість» яка відображає зростання відносної зносостійкості комплексно модифікованих покриттів у 2,2–3,1 рази порівняно з базовим наплавленим металом. Польові випробування відновлених лемішів і стрілчастих лап культиваторів у важких, кам'янистих ґрунтах показали зростання їх ресурсу в середньому на 35–40 %, а для оптимальних складів порошкових дротів – до 85–100 % відносно нових серійних деталей без відновлення. Техніко-економічна оцінка засвідчила можливість зниження сумарних витрат на ремонт і технічне обслуговування ґрунтообробної техніки майже на 40 % за рахунок скорочення кількості замін робочих органів, зменшення простоїв машин і раціональнішого використання металоресурсу. Показано, що розроблена технологія електрошлакового наплавлення з комплексним модифікуванням має суттєвий ресурсозберігаючий потенціал і може бути адаптована до відновлення інших деталей, які працюють в умовах інтенсивного абразивного та ударно-абразивного зношування.

Ключові слова: електрошлакове наплавлення, струмопідвідний кристалізатор, порошкові дроти, модифікуючі присадки, карбіди хрому, карбід ніобію, оксид алюмінію, мікроструктура, мікротвердість, абразивне зношування, робочі органи ґрунтообробних машин, економічна ефективність.

I. M. RYBALKO

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Service Engineering
and Materials Technology in Mechanical Engineering
named after O. I. Sidashenko
State Biotechnological University
ORCID: 0000-0002-3663-019X

A. V. ZAKHAROV

Doctor of Philosophy (PhD) in Materials Science
Kharkiv State Professional and Pedagogical College
named after V. I. Vernadsky
ORCID: 0000-0001-9894-7355

O. V. TIHOV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Service Engineering
and Materials Technology in Mechanical Engineering
named after O. I. Sidashenko
State Biotechnological University
ORCID: 0000-0001-7209-8375

INCREASING THE OPERATIONAL STABILITY OF WORKING PARTS OF SOIL CULTIVATION EQUIPMENT BY ELECTROSLACK SURFACE COATING WITH COMPLEX MODIFICATION OF THE COATING COVERINGS

The article discusses a comprehensive approach to improving the operational stability of working parts of soil cultivation equipment operating under conditions of intense abrasive and impact-abrasive wear. The object of study is plough blades and cultivator arrow-shaped tines, restored by electroslag surfacing in a current-fed crystalliser with the formation of thick surfaced layers and the use of powder wires, the mixture of which contains complex modifying additives based on chromium carbides, niobium carbide and aluminium oxide. The study is structured as a closed loop 'structure – microhardness – wear resistance – service life – economics, which allows tracing the entire chain of transformations from the micro level to practical technical and economic results. The design and principle of operation of the current-conducting crystalliser are described, a technological diagram of the electroslag surfacing process of working parts is presented, and the choice of the thickness of the surfaced layers is justified, taking into account the conditions of their operation in the soil.

Based on structural, electron microscopic and optical-mathematical studies, it has been shown that the use of complex-modified powder wires provides a transition from a coarse-grained martensitic matrix with local clusters of coarse carbides to a fine-grained structure with a uniformly developed dispersed carbide framework. According to the hardness and microhardness distribution maps, it has been established that complex modification with Cr carbides, NbC and Al₂O₃ increases the hardness of the surface zones by 15–20 % compared to unmodified coatings, while the hardness gradient across the layer thickness decreases, indicating better deformation compatibility of the coating with the base metal. The results of laboratory tests for sliding abrasive wear are summarised in the form of a 'hardness-wear resistance' diagram, which shows an increase in the relative wear resistance of complex-modified coatings by 2.2–3.1 times compared to the base deposited metal.

Field tests of refurbished ploughshares and cultivator tines in heavy, stony soils showed an average increase in their service life of 35–40%, and for optimal powder wire compositions – up to 85–100% compared to new serial parts without restoration. A technical and economic assessment showed that it is possible to reduce the total costs of repair and maintenance of soil cultivation equipment by almost 40% by reducing the number of replacements of working parts, reducing machine downtime and making more rational use of metal resources. It has been shown that the developed technology of electroslag surfacing with complex modification has significant resource-saving potential and can be adapted to the restoration of other parts that operate under conditions of intense abrasive and impact-abrasive wear.

Key words: electroslag surfacing, current-carrying crystalliser, powder wires, modifying additives, chromium carbides, niobium carbide, aluminium oxide, microstructure, microhardness, abrasive wear, working parts of soil cultivation machines, economic efficiency.

Постановка проблеми

Сучасні тенденції розвитку сільськогосподарського виробництва пов'язані з необхідністю виконання значних обсягів ґрунтообробних робіт у стислі агротехнічні строки, часто за несприятливих погодних і ґрунтових умов [1]. У таких ситуаціях відмови ґрунтообробних агрегатів, пов'язані зі зношуванням робочих органів, призводять не тільки до прямих фінансових втрат, але й до недобору врожаю через зрив оптимальних термінів виконання

операцій [2]. Лемеші плугів та стрілочасті лапи культиваторів працюють у середовищі, де поєднуються висока абразивність ґрунту, наявність твердих мінеральних включень і каміння, значні нормальні та дотичні навантаження, локальні ударні імпульси, вібрації, коливання вологості та температури [3]. За таких умов навіть при початково високій твердості матеріалу відбувається інтенсивне сточування металу з ріжучих кромок, зміна профілю робочої поверхні та зменшення товщини в критичних перерізах. Зношені лемеші і лапи вже не забезпечують необхідну якість обробки ґрунту, збільшується тяговий опір агрегату, зростає витрата пального, а ризик аварійних відмов у період пікових навантажень суттєво зростає [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Традиційні підходи до вирішення цієї проблеми базуються на двох основних стратегіях: використанні більш дорогих зносостійких матеріалів для виготовлення нових деталей та впровадженні різних методів поверхневого зміцнення. У першому випадку підвищення ресурсу досягається за рахунок застосування високолегованих сталей і чавунів із карбідним, боридним або комплексним зміцненням, однак такі деталі мають високу собівартість і потребують значних капіталовкладень при оновленні парку робочих органів [5]. У другому випадку використовуються термічна й хіміко-термічна обробка, газотермічне напилення, плазмове напилення, дугове наплавлення, які дозволяють формувати зміцнюючі поверхневі шари деталей. Газотермічні й плазмові методи забезпечують високу твердість тонких покриттів, але товщина таких шарів часто є недостатньою для тривалої роботи в умовах абразивного ґрунту [6].

Дугове наплавлення дозволяє отримувати товстіші шари, проте супроводжується значними термічними деформаціями, високим рівнем залишкових напружень, ризиком появи тріщин, пор і інших дефектів, особливо при відновленні масивних і відповідальних деталей [7]. Усі ці обставини стимулюють пошук таких технологій відновлення, які б одночасно забезпечували формування товстих покриттів з керованою структурою, дозволяли б гнучко змінювати хімічний склад наплавленого металу, мали б високий ступінь повторюваності результатів і були б економічно доцільними для впровадження у практику технічного сервісу аграрних підприємств [8].

Електрошлакове наплавлення (ЕШН) у струмопідвідному кристалізаторі відповідає зазначеним вимогам, оскільки поєднує в собі переваги об'ємного електрошлакового процесу (глибоке рафінування металу, стабільний тепловий режим, скрапування шлаком, зниження залишкових напружень) із можливістю відновлення деталей складної форми [9]. Струмопідвідний кристалізатор виконує одночасно функцію формуючої оснастки, елемента електричного кола та системи тепловідведення, що дозволяє локалізувати процес у зоні наплавлення й зменшити термічний вплив на решту деталі. Додаткові можливості відкриває використання порошкових дріт-ів зі спеціально підібраною шихтою, яка може включати комплексні модифікуючі присадки. Введення таких присадок безпосередньо в металеву ванну ЕШН дає змогу цілеспрямовано впливати на процеси кристалізації, формування фазового складу, морфологію й розподіл зміцнюючих фаз, а отже – керувати структуроутворенням наплавленого металу.

Проведене узагальнення наукових публікацій [10-14] показує, що у багатьох роботах зосереджено увагу або на конструкції й режимах роботи електрошлакових установок, або на описі структури й властивостей окремих типів покриттів, отриманих різними методами. Значно менше досліджень присвячено комплексному полікомпонентному модифікуванню наплавленого металу з використанням композиційних порошкових дріт-ів, у яких одночасно присутні кілька типів тугоплавких фаз, здатних синергетично впливати на процеси структуроутворення. Також у наявних публікаціях украї рідко послідовно й кількісно простежується весь ланцюг «модифікатор – структура – мікротвердість – зносостійкість – ресурс – економіка» для деталей ґрунтообробної техніки, що працюють у важких ґрунтово-кліматичних умовах і зазнають комбінованого абразивного та ударно-абразивного зношування.

Таким чином, актуальною науково-прикладною задачею є побудова такого підходу, який би дозволив не просто показати окремі позитивні ефекти від введення модифікуючих присадок, а й системно обґрунтувати їх вплив на всі рівні – від мікроструктури до техніко-економічних показників роботи сільськогосподарських агрегатів [15].

Формулювання мети дослідження

Метою проведеного дослідження було наукове обґрунтування та експериментальне підтвердження можливості підвищення експлуатаційної стійкості робочих органів ґрунтообробної техніки шляхом застосування електрошлакового наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі з використанням порошкових дріт-ів, шихта яких містить комплексні модифікуючі присадки на основі карбідів хрому, карбіду ніобію та оксиду алюмінію, та на основі цього розробити інженерно орієнтовану методику вибору складів покриттів, яка враховує зв'язок між структурою, мікротвердістю, зносостійкістю, ресурсом і економічною ефективністю.

Викладення основного матеріалу дослідження

Об'єктами дослідження були лемеші плугів зі сталі 65Г та стрілочасті лапи культиваторів зі сталі 45, які вже відпрацювали ресурс в умовах реальної експлуатації. Перед відновленням деталі піддавали стандартному комплексу підготовчих операцій: очищенню, дефектуванню, видаленню сильно зношених і пошкоджених ділянок, механічному підрівнюванню поверхні. У зоні наплавлення формували підкладку товщиною орієнтовно

35 мм, що забезпечувало поєднання достатньої міцності основи та раціональної витрати наплавлюваного металу. Електрошлакове наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі задовольняє зазначені вимоги [16]. Наявність шлакової ванни забезпечує рафінування металу, стабілізацію теплового режиму й захист від атмосферного впливу, а струмопідвідний кристалізатор виконує роль одночасно формуючої оснастки та елемента електричного кола. На рис. 1, де показано розташування деталі, шлакової й металевої ванн, електрода, зон підведення струму та каналів охолодження. На основі цієї схеми було реалізовано відновлення лемешів і лап зі сталі 65Г та 45 відповідно.

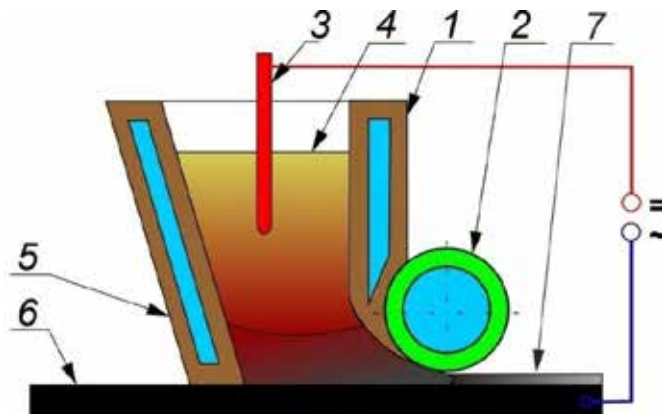


Рис. 1. Технологічна схема електрошлакового наплавлення робочих органів ґрунтообробної техніки у струмопідвідному кристалізаторі: 1 – кокіль-кристалізатор; 2 – валок кристалізатора; 3 – наплавочний дріт; 4 – шлакова ванна; 5 – металева ванна; 6 – наплавлений метал

Перед наплавленням деталі проходили очищення, дефектування та механічну підготовку зони відновлення із формуванням підкладки товщиною близько 35 мм, що забезпечувало достатню міцність основи й раціональну витрату наплавлюваного металу. У процесі ЕШН формували наплавлені шари товщиною 20–25 мм, у результаті чого сумарна товщина відновленої ділянки досягала 55–60 мм. Такий вибір є компромісом між необхідністю забезпечити тривалий ресурс у важких ґрунтових умовах і недопустимістю перевитрати наплавлюваного металу та зростання маси робочого органу.

Ключовим елементом дослідження були порошкові дроти, шихта яких відрізнялася за складом і вмістом модифікуючих компонентів.

Базовий варіант формував наплавлений метал без спеціальних тугоплавких модифікаторів і служив для порівняння.

У другому варіанті вводили карбіди хрому, які забезпечували формування хромвмісних карбідних фаз.

Третій варіант поєднував Cr-карбіди з карбідом ніобію, що збільшувало кількість гетерогенних центрів кристалізації та сприяло подрібненню зерна.

Четвертий, комплексно модифікований варіант, окрім Cr-карбідів і NbC, містив оксид алюмінію, який впливав як на властивості шлакової фази (в'язкість, електропровідність, рафінувальні властивості), так і на механізм зародження й росту кристалів у металевій ванні.

На основі результатів спектрального аналізу напавленого металу для кожного з розроблених варіантів дротів визначено усереднений (орієнтовний) хімічний склад напавлених покриттів; відповідні дані узагальнено в табл. 1.

Таблиця 1

Орієнтовний хімічний склад напавлених покриттів, отриманих при застосуванні різних типів порошкових дротів (за даними спектрального аналізу)

Компонент	Вміст, %
Хром	30
Нікель	10
Карбідкремнію	5
Основа(залізо)	55

За результатами спектрального аналізу було встановлено, що введення модифікуючих присадок змінює не лише концентрацію відповідних елементів (Cr, Nb, Al), а й впливає на взаємодію основних легувальних компонентів у металевій ванні, що відіграє ключову роль у подальшому формуванні структури.

Структуру наплавлених покриттів досліджували за допомогою оптичної й електронної мікроскопії [17]. Для базового наплавленого металу характерною була порівняно крупнозерниста мартенситна матриця з поодинокими крупними карбідами, які розташовувалися нерівномірно й утворювали окремі зони з високою концентрацією зміцнюючих фаз на тлі м'якшої основи. Така структура, з одного боку, забезпечувала певне підвищення твердості, а з іншого – формувала небажані концентратори напружень, що могло сприяти зародженню й росту тріщин під дією змінних навантажень. Структурні дослідження проводили за допомогою оптичної й електронної мікроскопії. Для базового наплавленого металу спостерігали відносно крупнозернисту мартенситну матрицю з поодинокими грубими карбідами, які розташовувалися нерівномірно, утворюючи зони підвищеної концентрації зміцнюючих фаз і водночас – потенційні концентратори напружень [18]. При переході до комплексно модифікованого складу структура зазнавала принципової зміни: матриця ставала дрібнозернистою, а карбідні включення формували розгалужений дисперсний каркас, рівномірно розподілений у всьому об'ємі наплавленого металу. Ці відмінності доведено електронно-мікроскопічними зображеннями (рис. 2).

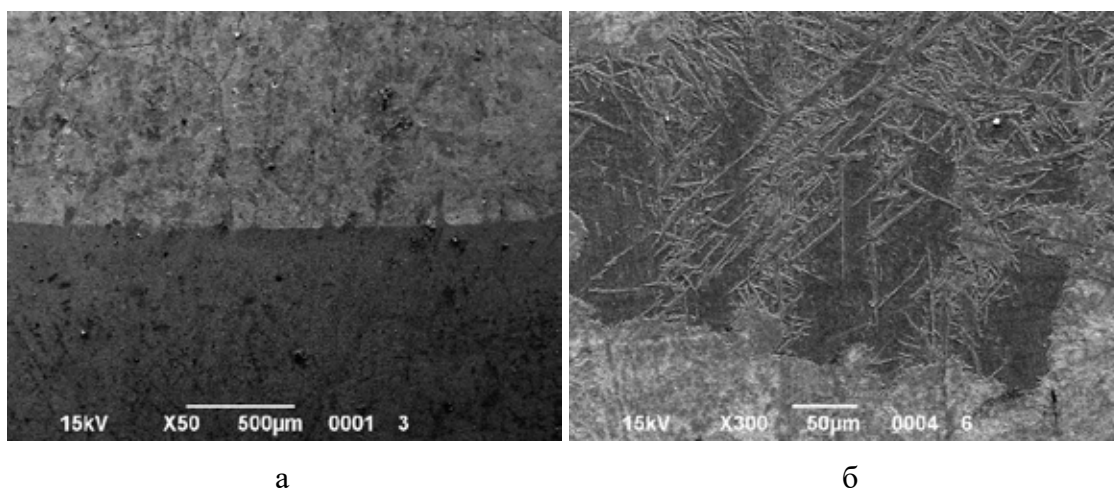


Рис. 2. Мікроструктура наплавленого металу робочих органів ґрунтообробної техніки:
а – покриття, сформоване базовим порошковим дротом; б – покриття, сформоване дротом з комплексним модифікуванням (Cr-карбіди, NbC, Al₂O₃)

Для кількісної оцінки структурних параметрів застосовано оптико-математичний аналіз цифрових мікрозображень. За допомогою відповідного програмного забезпечення автоматично визначали межі зерен, вимірювали їх площу, обчислювали середній розмір зерна, оцінювали площинну частку зміцнюючих фаз і ступінь кластеризації карбідних включень (див.табл. 2).

Таблиця 2

Вплив вмісту карбідів на твердість, зносостійкість та розмір зерна наплавлених покриттів

Вміст карбідів(%)	Твердість (HRC)	Втрати маси(г)	Розмір зерна (мкм)
0	42	0.0028	15
5	48	0.0023	10
10	52	0.0019	8
15	50	0.0021	9

З таблиці 2 видно, що для базового покриття середній розмір зерна є найбільшим, площинна частка дрібнодисперсних фаз – найменшою, а показники кластеризації свідчать про виражену схильність до утворення великих скупчень карбідів. Для комплексно модифікованих покриттів ситуація протилежна: середній розмір зерна істотно зменшується, площинна частка зміцнюючих фаз зростає, а кластеризація знижується, що означає більш рівномірний розподіл карбідних включень у матриці. Така структура, з точки зору трибології, є більш сприятливою, оскільки дрібнозерниста матриця ефективніше протидіє зародженню й росту мікротріщин, а рівномірний карбідний каркас дозволяє розподіляти навантаження від зерен абразиву без утворення локальних концентраторів напружень [19].

Оцінка механічних властивостей покриттів проводилася на основі вимірювань твердості й мікротвердості. Для візуалізації розподілу твердості по перерізу наплавлених шарів було побудовано карти твердості, які відображають зміну цього параметра в площині зразка. Типові карти твердості, отримані методом індуентування, наведено на рисунку 3.

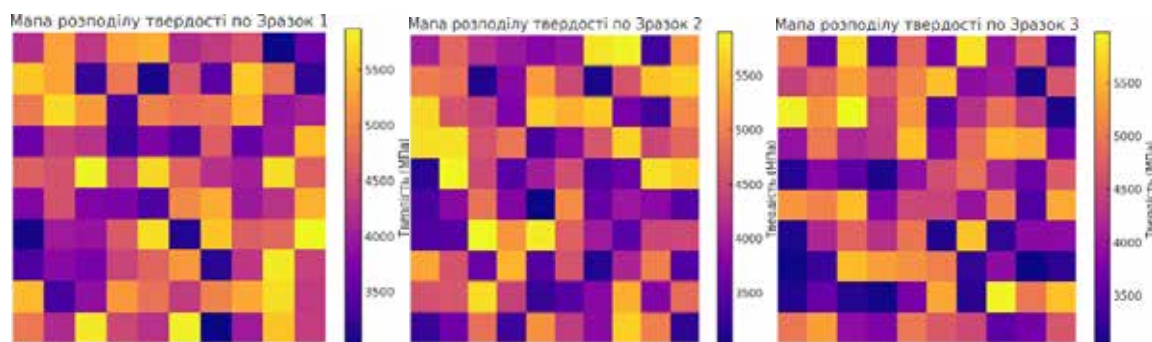


**Рис. 3. Розподіл твердості наплавлених шарів за результатами індування
(карти твердості дослідних зразків)**

За картами твердості (рис. 3) добре видно, що базові покриття характеризуються більш різкою зміною твердості від поверхні до зони з'єднання з основним металом, тоді як у комплексно модифікованих покриттях колірна палітра більш рівномірна, що відображає зменшення градієнта твердості по товщині [20]. При цьому максимальні значення твердості в приповерхневій зоні для модифікованих покриттів на 15–20 % вищі, ніж у базового варіанту. Таким чином, модифікуючі присадки забезпечують не лише підвищення рівня твердості, а й більш «пологий» розподіл цього параметра в об'ємі шару, що є важливим для забезпечення деформаційної сумісності покриття та основи.

Лабораторні випробування на абразивне зношування проводили для всіх варіантів покриттів. Зразки працювали в абразивному середовищі при фіксованому навантаженні й довжині шляху тертя; після випробувань визначали втрату маси й розраховували відносну зносостійкість щодо базового варіанту [21]. У таблиці 3 наведено результати таких випробувань, зокрема вплив вмісту модифікуючої добавки (графіту як прикладу одного з компонентів шихти) на адгезійну міцність, твердість та інтенсивність зношування.

Таблиця 3

Вплив вмісту модифікуючої добавки (графіту) на адгезійну міцність, твердість та знос при ковзному абразивному навантаженні.

Вміст графіту(%)	Адгезійна міцність(МПа)	Втрати маси при зносі (г)	Твердість(HRC)
0	60	0.0025	46
1	65	0.0022	48
2	70	0.0019	50
3	68	0.0020	49

Дані таблиці 3 доводять, що зміна вмісту добавок дозволяє регулювати не лише твердість, а й адгезійну міцність і знос, причому раціональні значення досягаються не при максимальній твердості, а в деякому її діапазоні, де забезпечується найкраще поєднання властивостей [22]. Для узагальнення результатів випробувань на знос та зіставлення їх із даними щодо мікротвердості наплавлених покриттів було побудовано діаграму «твердість – зносостійкість», яка наведена як рисунок 4.

Ця залежність демонструє, що зі зростанням середньої мікротвердості відносна зносостійкість покриттів зростає, але характер зростання є нелінійним: на початковій ділянці крива крута, далі виходить на більш пологий режим. Комплексно модифіковані покриття знаходяться в області, де досягається найбільш вигідне співвідношення між твердістю й зносостійкістю – при відносній зносостійкості 2,2–3,1 рази відносно немодифікованого шару. Це підтверджує, що обраний рівень твердості й структура покриттів є близькими до оптимальних в умовах ковзного абразивного навантаження.

Результати лабораторних досліджень були перевірені в реальних умовах експлуатації [23]. Польові випробування проводили на серійних плугах і культиваторах, оснащених трьома варіантами робочих органів: новими серійними лемешами плугів зі сталі 65Г та стрілчастими лапами культиваторів зі сталі 45; тими самими деталями, відновленими електрошлаковим наплавленням базового (немодифікованого) покриття; а також деталями з покриттями, сформованими четвертим, комплексно модифікованим варіантом порошкового дроту з введенням карбідів хрому, карбіду ніобію та оксиду алюмінію. Агрегати працювали по важких, кам'янистих ґрунтах; у процесі експлуатації фіксували площу обробітку, контролювали стан робочих кромek, визначали втрату маси та геометричну зміну профілю. У такому форматі отримували узагальнені результати польових випробувань: площу обробітку до досягнення граничного стану, втрату маси та відносний ресурс.

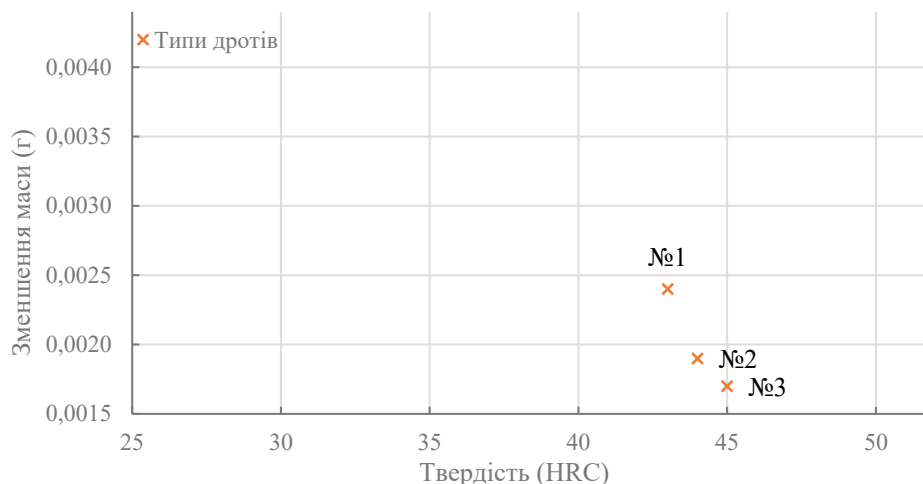


Рис. 4. Узагальнений взаємозв'язок між твердістю та зносостійкістю наплавлених покриттів

Агрегати працювали по важких, кам'янистих ґрунтах; у процесі експлуатації фіксували площу обробітку, контролювали стан робочих кромek, визначали втрату маси й геометричну зміну профілю. У таблиці 4 узагальнено результати польових випробувань: площу обробітку до досягнення граничного стану, втрату маси та відносний ресурс.

Таблиця 4

Порівняльні показники твердості та зносостійкості серійних і відновлених робочих органів за результатами польових випробувань

Характеристика	Серійні деталі	Відновлені деталі
твердість, HRC	40-42	56-62
зносостійкість, %	100	140

Для візуалізації даних використано графік залежності втрати маси робочих органів від площі обробітку, який подано на рисунку 5.

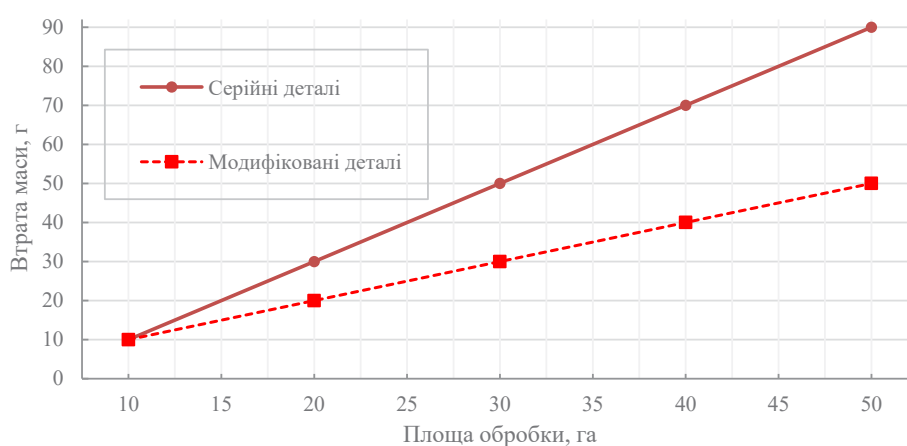


Рис. 5. Залежність втрати маси серійних і модифікованих робочих органів від площі обробітку ґрунту за результатами польових випробувань

Крива для нових серійних деталей має найбільший нахил, що відповідає найвищій швидкості зношування. Для деталей, відновлених немодифікованими покриттями, нахил менший, але ефект обмежений. Найбільш пологою криву має варіант із комплексно модифікованими покриттями: інтенсивність втрати маси мінімальна, а площа обробітку до досягнення граничного стану максимальна. За даними табл. 4 і рис. 5, середнє збільшення ресурсу робочих органів із комплексно модифікованими покриттями становить 35–40 %, а за оптимальних складів порошкових дротів – до 85–100 % порівняно з новими серійними деталями без відновлення.

Отриманий приріст ресурсу використовувався для розрахунку економічних показників. Для цього порівнювали два сценарії: традиційний – із використанням лише нових серійних деталей, та запропонований – із впровадженням технології електрошлакового наплавлення з комплексним модифікуванням і повторним використанням відновлених робочих органів. У розрахунки включали витрати на закупівлю нових деталей, вартість матеріалів і енергії для наплавлення, оплату праці персоналу, а також втрати від простоїв техніки під час заміни деталей та відмов у період польових робіт. Узагальнені результати наведено в таблиці 5.

Таблиця 5

Порівняння економічної ефективності застосування оптимізованого та традиційного складів порошкових дротів.

Показник	Оптимізований склад	Традиційний склад
вартість 1кг.дроту (грн)	700	920
термін служби покриття (год)	5000	3500
частота ремонту (разів/рік)	2	4

Аналіз таблиці 5 свідчить, що впровадження технології електрошлакового наплавлення з комплексним модифікуванням покриттів дозволяє знизити сумарні витрати на ремонт і технічне обслуговування ґрунтообробної техніки майже на 40 %. Такий ефект досягається за рахунок зменшення кількості закупівель нових деталей, скорочення простоїв під час заміни, можливості більш рівномірно планувати ремонтні роботи в міжсезоння та раціональніше використовувати існуючий парк робочих органів.

Висновки

Узагальнюючи результати, можна сформулювати такі висновки:

– Електрошлакове наплавлення у струмопідвідному кристалізаторі з використанням порошкових дротів, шихта яких містить комплексні модифікуючі присадки на основі карбідів хрому, карбіду ніобію та оксиду алюмінію, забезпечує формування дрібнозернистої мартенситної матриці з рівномірно розвинутим дисперсним карбідним каркасом. Саме така структура є сприятливою з погляду опору абразивному та ударно-абразивному зношуванню.

– Введення комплексних модифікуючих присадок забезпечує формування дрібнозернистої мартенситної матриці з рівномірно розвинутим дисперсним карбідним каркасом, підвищення твердості при зменшенні її градієнта по товщині, зростання відносної зносостійкості в 2,2–3,1 рази та збільшення ресурсу лемешів і лап у реальних умовах експлуатації в середньому на 35–40 %, а в окремих випадках – до 85–100 % порівняно з новими серійними деталями. Отримано й проаналізовано кількісні залежності між параметрами мікроструктури, мікротвердістю та абразивною зносостійкістю покриттів. Показано, що зміна складу модифікуючих присадок і пов'язана з цим еволюція структури безпосередньо відображаються на трибологічних характеристиках наплавлених шарів

– Техніко-економічна оцінка підтверджує, що впровадження розробленої технології електрошлакового наплавлення з комплексним модифікуванням може забезпечити зниження сумарних витрат на ремонт і технічне обслуговування ґрунтообробної техніки майже на 40 %, що є вагомим аргументом на користь її широкого практичного застосування. Одержані результати створюють підґрунтя для подальшого розширення номенклатури модифікуючих систем, удосконалення моделей структуроутворення в умовах електрошлакових процесів та адаптації технології до відновлення інших деталей машин, що працюють в умовах інтенсивного абразивного й ударно-абразивного зношування.

Список використаної літератури

1. Черновол М. І., Лопата Т. В. Умови експлуатації та основні причини виходу з ладу ріжучих елементів робочих органів сільськогосподарських машин [Електронний ресурс]. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2011. Вип. 24, ч. II. С. 17–22. Режим доступу: <https://dspace.kntu.kr.ua/>...
2. Мікосянчик О. О., Шамрай В. Б., Лопата Л. А., Голембієвський Г. Г., Горб Є. С. Композиційні матеріали для зносостійких покриттів деталей сільськогосподарських машин. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. № 1(98). С. 4–10. DOI: 10.18372/0370-2197.1(98).17356.
3. Ставинський А., Вахоніна Л., Мартиненко В., Мардзявко В., Руденко А. Використання поверхневого зміцнення для підвищення зносостійкості робочих органів сільськогосподарських машин. *Біосистеми і аграрні технології*. 2024. Т. 28, № 2. С. 21–32. DOI: 10.56407/bs.agrarian/2.2024.21.
4. Czapryński A. Microstructure and Abrasive Wear Resistance of Metal Matrix Composite Coatings Deposited on Steel Grade AISI 4715 by Powder Plasma Transferred Arc Welding. Part 1. Mechanical and Structural Properties of a Cobalt-Based Alloy Surface Layer Reinforced with Particles of Titanium Carbide and Synthetic Metal–Diamond Composite. *Materials*. 2021. Vol. 14, № 9. P. 2382.

5. Падалка В. В., Каркач О. С. Аналіз технологій поверхневого зміцнення робочих органів сільсько-господарських машин. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2012. № 2/1(4). С. 28–30. DOI: 10.15587/2312-8372.2012.4881.
6. Савченко В. М., Борак К. В., Голощук В. О., Гордієнко В. С. Зносостійкі покриття для машин, що працюють в абразивному середовищі. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2020. № 3. С. 45–50.
7. Кусков Ю. М., Рябцев І. О. *Електрошлакове наплавлення. Матеріали, технології, обладнання*. Київ: Інтерсервіс, 2022. 284 с.
8. Скворцов О. В. Дослідження структури та трибологічних властивостей композиційного покриття на основі нанокристалічного хрому. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 2. С. 45–50.
9. Aramide B., Pityana S., Sadiku R., Jamiru T., Popoola P. Improving the durability of tillage tools through surface modification – a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 116(1). P. 83–98. DOI: 10.1007/s00170-021-07487-4.
10. Aswad M. F., Mohammed A. J., Faraj S. R. Induction surface hardening: A review. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1973. Article No. 012087. DOI: 10.1088/1742-6596/1973/1/012087.
11. Сайчук О. В., Рибалко І. М., Захаров А. В. Електрошлакове наплавлення на постійному струмі в струмопідвідному кристалізаторі електродом великого перерізу. *Науковий збірник «InterConf»*. 2022. № 127. С. 229–237.
12. Kuskov Yu. M., Gordan G. N., Bogajchuk I. L. [et al.] Electroslag surfacing using discrete materials of different methods of manufacture. *The Paton Welding Journal*. 2015. № 5–6. P. 30–33. DOI: 10.15407/tpwj2015.06.06.
13. Гориславець Ю. М., Бондар О. І., Проскудін В. М., Кусков Ю. М., Римар С. В., Нетяга А. В. Моделювання електромагнітних процесів в секційному кристалізаторі для електрошлакового наплавлення металу. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 4. С. 64. DOI: 10.15407/techned2022.04.064.
14. Кусков Ю. М., Проскудін В. М., Нетяга А. В. Модернізація печей ЕШП в установки для ЕШН прокатних валків у струмопідвідному кристалізаторі. *Сучасна електрометалургія*. 2021. № 3. С. 4–9. DOI: 10.37434/sem2021.03.02.
15. Скобло Т. С., Рибалко І. М., Захаров А. В. Аналіз електрошлакового наплавлення металу з малою товщиною відновлювально-зміцнювального робочого шару деталі. *Промисловість у фокусі*. 2021. № 10. С. 54–56.
16. Рибалко І. М., Захаров А. В., Сайчук О. В., Коротій В. О. Дослідження причин проплавлення основного металу при електрошлаковому напавленні і методи його регулювання. *Вісник ХНТУ*. 2023. № 4(87). DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2023.4.15.
17. Dilthey U., Woeste K., Aretov I. Modification of the electroslag remelting process to weld surfacing. *Welding and Cutting*. 2006. № 4. P. 215–220.
18. Galazzi G., Rigdal S., Kubenka M. Practical application of ESAB strip cladding technology. *Svetsaren*. 2007. № 1. P. 17–22.
19. Захаров А.В., Рибалко І.М., Тіхонов О.В. Переваги використання технології електрошлакового наплавлення для відновлення деталей ґрунтообробної техніки: лемешів і культиваторних лап. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки*. 2024. Вип. 40. С. 5–12. DOI: 10.32782/2522-1221-2024-40-01.
20. Захаров А.В., Рибалко І.М., Тіхонов О.В. Зносостійкість та ресурс відновлених і зміцнених електрошлаковим наплавленням лемешів і культиваторних стрілочастих лап. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2024. № 4(497). С. 20–27. DOI: 10.15589/znpp2024.4(497).4.
21. Захаров А.В. Прогнозування зносостійкості робочих органів ґрунтообробної техніки під час їх відновлення методом електрошлакового наплавлення. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 4(91). С. 24–32. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2024.4.3.
22. Захаров А. В. Застосування модифікуючих присадок та їх введення у відновлювальні покриття для підвищення експлуатаційної стійкості : дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії : 132 «Матеріалознавство» / Захаров Андрій Вадимович. – Харків : Державний біотехнологічний університет, 2025. – 276 с.
23. 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. Інженерні науки*. 2022. № 4(83). С. 37–42.

References

1. Chernovol, M. I., & Lopata, T. V. (2011). *Umovy ekspluatatsii ta osnovni prychny vykhodu z ladu rizhuchykh elementiv robochykh orhaniv silskohospodarskykh mashyn* [Operating conditions and main failure causes of cutting elements of agricultural machinery]. *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia*, 24(II), 17–22. <https://dspace.kntu.kr.ua/>
2. Mikosianchyk, O. O., Shamrai, V. B., Lopata, L. A., Golembievskiy, H. H., & Horb, Ye. S. (2023). Kompozytsiini materialy dlia znosostiikykh pokryttiv detalei silskohospodarskykh mashyn. *Problemy tertia ta znoshuvannia*, 1(98), 4–10. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(98\).17356](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(98).17356)

3. Stavyinskyi, A., Vakhonina, L., Martynenko, V., Mardziavko, V., & Rudenko, A. (2024). Vykorystannia poverkhnevoho zmitsnennia dlia pidvyshchennia znosostiikosti robochykh orhaniv silskohospodarskykh mashyn. *Biosystemy i ahrarni tekhnologii*, 28(2), 21–32. <https://doi.org/10.56407/bs.agrarian/2.2024.21>
4. Czupryński, A. (2021). Microstructure and abrasive wear resistance of metal matrix composite coatings deposited on steel grade AISI 4715 by powder plasma transferred arc welding: Part 1. *Materials*, 14(9), Article 2382. <https://doi.org/10.3390/ma14092382>
5. Padalka, V. V., & Karkach, O. S. (2012). Analiz tekhnologii poverkhnevoho zmitsnennia robochykh orhaniv silskohospodarskykh mashyn. *Tekhnolohichniy audit ta rezervy vyrobnytstva*, 2/1(4), 28–30. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2012.4881>
6. Savchenko, V. M., Borak, K. V., Holoshchuk, V. O., & Hordienko, V. S. (2020). Znosostiiki pokryttia dlia mashyn, shcho pratsiuiut v abrazivnomu seredovyshchi. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*, 3, 45–50.
7. Kuskov, Yu. M., & Riabtsev, I. O. (2022). *Elektroshlakove naplavlennia. Materialy, tekhnologii, obladnannia*. Interservis.
8. Skvortsov, O. V. (2023). Doslidzhennia struktury ta trybolohichnykh vlastyvostei kompozytsiinoho pokryttia na osnovi nanokrystalichnoho khromu. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, 2, 45–50.
9. Aramide, B., Pityana, S., Sadiku, R., Jamiru, T., & Popoola, P. (2021). Improving the durability of tillage tools through surface modification: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116(1), 83–98. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07487-4>
10. Aswad, M. F., Mohammed, A. J., & Faraj, S. R. (2021). Induction surface hardening: A review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1973, Article 012087. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012087>
11. Saichuk, O. V., Rybalko, I. M., & Zakharov, A. V. (2022). Elektroshlakove naplavlennia na postiinomu strumi v strumopidvidnomu krystalizatori elektrodom velykoho pererizu. *InterConf*, 127, 229–237.
12. Kuskov, Yu. M., Gordan, G. N., Bogajchuk, I. L., et al. (2015). Electroslag surfacing using discrete materials of different methods of manufacture. *The Paton Welding Journal*, 5–6, 30–33. <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.06.06>
13. Horyslavets, Yu. M., Bondar, O. I., Proskudin, V. M., Kuskov, Yu. M., Rymar, S. V., & Netiaha, A. V. (2022). Modeliuvannia elektromahnitnykh protsesiv v sektsiinomu krystalizatori dlia elektroshlakovoho naplavlennia metalu. *Tekhnichna elektrodynamika*, 4, 64. <https://doi.org/10.15407/techne2022.04.064>
14. Kuskov, Yu. M., Proskudin, V. M., & Netiaha, A. V. (2021). Modernizatsiia pechei EShP v ustanovky dlia EShN prokatnykh valkiv u strumopidvidnomu krystalizatori. *Suchasna elektrometalurhiia*, 3, 4–9. <https://doi.org/10.37434/sem2021.03.02>
15. Skoblo, T. S., Rybalko, I. M., & Zakharov, A. V. (2021). Analiz elektroshlakovoho naplavlennia metalu z maloii tovshchynoiu vidnovliuvalno-zmitsniuvalnoho sharu detali. *Promyslovist u fokusi*, 10, 54–56.
16. Rybalko, I. M., Zakharov, A. V., Saichuk, O. V., & Korotii, V. O. (2023). Doslidzhennia prychnyn proplavlennia osnovnoho metalu pry elektroshlakovomu naplavlenni ta metody yoho rehuliuвання. *Visnyk KHNTU*, 4(87). <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.15>
17. Dilthey, U., Woeste, K., & Aretov, I. (2006). Modification of the electroslag remelting process to weld surfacing. *Welding and Cutting*, 4, 215–220.
18. Galazzi, G., Rigdal, S., & Kubenka, M. (2007). Practical application of ESAB strip cladding technology. *Svetsaren*, 1, 17–22.
19. Zakharov, A. V., Rybalko, I. M., & Tihonov, O. V. (2024). Perevahy vykorystannia tekhnologii elektroshlakovoho naplavlennia dlia vidnovlennia detalei gruntookhrobnoi tekhniki. *Visnyk Lvivskoho torhovelno-ekonomichnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, 40, 5–12. <https://doi.org/10.32782/2522-1221-2024-40-01>
20. Zakharov, A. V., Rybalko, I. M., & Tihonov, O. V. (2024). Znosostiikist ta resurs vidnovlenykh i zmitsnennykh elektroshlakovym naplavlenniam lemishiv i kul'tivatornykh lap. *Zbirnyk naukovykh prats NUK im. Makarova*, 4(497), 20–27. [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).4](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).4)
21. Zakharov, A. V. (2024). Prohnozuvannia znosostiikosti robochykh orhaniv gruntookhrobnoi tekhniki pry yikh vidnovlenni metodom elektroshlakovoho naplavlennia. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, 4(91), 24–32. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.3>
22. Zakharov, A. V. (2025). *Zastosuvannia modyfikuiuchykh prysadok ta yikh vvedennia u vidnovliuvalni pokryttia dlia pidvyshchennia ekspluatatsiinoi stiikosti* (Doctoral dissertation). Derzhavnyi biotekhnolohichniy universytet.
23. Rybalko, I. M., Tihonov, O. V., Zakharov, A. V., & Honcharenko, O. O. (2022). Modyfikuvannia renovatsiinykh pokryttiv dlia pidvyshchennia znosostiikosti kultivatornykh lap. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Inzhenerni nauky*, 4(83), 37–42.

Дата першого надходження рукопису до видання: 17.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

С. А. РУСАНОВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-1003-4867

О. І. КЛЮЄВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-6803-0706

Д. О. ДМИТРІЄВ

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-8200-351X

І. А. ШАТОХІНА

старший викладач кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-5767-3674

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ТА НЕРІВНОМІРНОСТІ РОЗІГРІВУ ГОЛОВКИ ТА БЛОКУ ЦИЛІНДРІВ ПРИ ПЕРЕДПУСКОВІЙ ТЕПЛОВІЙ ПІДГОТОВЦІ АВТОМОБІЛЬНИХ ДВИГУНІВ

У роботі представлено результати чисельного моделювання процесів теплопередачі під час передпускової теплової підготовки двигуна внутрішнього згоряння із використанням системи рідинного підігріву. Метою дослідження є визначення просторової нерівномірності прогріву елементів двигуна, зокрема блоку та головки циліндрів, а також оцінювання гідродинамічних характеристик теплоносія у каналах системи охолодження. Для виконання розрахунків застосовано метод скінченних об'ємів з використанням $k-\epsilon$ моделі турбулентності, яка забезпечує адекватний баланс між точністю результатів та обчислювальною ефективністю при турбулентних режимах руху рідини. Циркуляція при теплопідготовці за схемою, що моделюється, організована з входом через випускний клапан антифризу та виходом через зливний патрубок.

Отримані результати дозволили ідентифікувати застійні зони, що формуються у ділянках, віддалених від вхідного патрубку, та призводять до суттєвої нерівномірності температурного поля. Встановлено, що перепад температур у головці блоку циліндрів може досягати 20°C , а в стінках циліндрів – до $30\text{--}40^{\circ}\text{C}$. Нижня частина карттера практично не бере участі у процесі теплообміну, що свідчить про неповноту прогріву двигуна під час попередньої теплової підготовки. Розрахований загальний перепад тиску в системі становить близько 1658 Па .

Проведене дослідження підтверджує важливість використання CFD-моделювання як ключового інструменту для комплексного аналізу систем передпускового підігріву. Такі розрахунки дають змогу оптимізувати геометрію каналів, схеми циркуляції теплоносія та параметри теплообмінного обладнання, що, у підсумку, підвищує ефективність використання накопиченого тепла і сприяє скороченню часу виходу двигуна на робочий тепловий режим. Отримані результати можуть бути використані для подальшої побудови інтегрованих моделей повного циклу теплопідготовки транспортних двигунів.

Ключові слова: передпусковий підігрів, чисельне моделювання, гідродинаміка, теплообмін, чисельні методи, системи автоматизованого моделювання.

S. A. RUSANOV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Systems
and Technical Service
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-1003-4867

O. I. KLIUIEV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Systems
and Technical Service
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-6803-0706

D. O. DMYTRIIEV

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Automation, Robotics and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-8200-351X

I. A. SHATOKHINA

Senior Lecturer at the Department of Transport Systems
and Technical Service
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-5767-3674

COMPUTER SIMULATION OF HYDRODYNAMICS AND HEATING NON-UNIFORMITY OF THE CYLINDER HEAD AND BLOCK DURING PRE-START THERMAL CONDITIONING OF AUTOMOTIVE ENGINES

The paper presents the results of numerical simulation of heat transfer processes during the pre-start thermal conditioning of an internal combustion engine using a liquid heating system. The main objective of the study is to determine the spatial non-uniformity of heating within the engine components—particularly the cylinder block and cylinder head—and to evaluate the hydrodynamic characteristics of the coolant in the cooling system channels. The calculations were performed using the finite volume method combined with the $k-\varepsilon$ turbulence model, which provides an appropriate balance between computational efficiency and accuracy under turbulent flow conditions. In the simulated preheating configuration, coolant circulation is organized with the inlet through the antifreeze outlet valve and the outlet through the drain pipe.

The obtained results made it possible to identify stagnant zones forming in regions remote from the inlet pipe, which lead to significant temperature field non-uniformity. It was found that the temperature difference in the cylinder head can reach up to 20°C, while in the cylinder walls it can reach 30–40°C. The lower part of the engine crankcase practically does not participate in the heat exchange process, indicating incomplete heating of the engine during pre-start thermal conditioning. The total pressure drop in the system was calculated to be approximately 1658 Pa.

The conducted study confirms the importance of CFD modeling as a key tool for comprehensive analysis of pre-start heating systems. Such simulations allow optimization of channel geometry, coolant flow schemes, and heat exchanger parameters, ultimately improving the efficiency of stored heat utilization and reducing the time required for the engine to reach its operating thermal regime. The obtained results can be further used in developing integrated models of the complete thermal preparation cycle for vehicle engines.

Key words: pre-start heating, numerical simulation, hydrodynamics, heat transfer, numerical methods, computer-aided modeling systems.

Постановка проблеми

Забезпечення правильного теплового режиму двигуна внутрішнього згоряння автомобіля, підтримка стабільної та оптимальної температури його роботи є достатньо важливим інженерним завданням. Від ефективності підтримання теплового режиму залежать екологічні показники транспортного засобу, економія пального та зручність його експлуатації.

Одним з важливих питань теплового режиму є питання передпускової підготовки двигуна. В першу чергу проблема передпускової підготовки постає в холодну пору року і особливо стосується промислового автопарку, але ж проблема актуальна й для гібридних транспортних засобів, для яких вона може бути навіть ще більш нагальною. Холодний пуск знижує строки міжремонтної експлуатації та сприяє загальному скороченню строка служби

двигуна, приводить до зростання споживаного стартером пускового струму, погіршує комфорт початку руху в зимових умовах, погіршує економічні характеристики двигуна (зокрема, підвищує витрати пального), екологічні показники. Зменшення кількості шкідливих викидів під час запуску та прогрівання двигуна ускладнюється низькою температурою його елементів і потребою збагачувати паливно-повітряну суміш для забезпечення стабільного займання. Наявність каталізатора не вирішує цієї проблеми, адже для ефективного функціонування він також має досягти робочої температури. Погіршення сумішоутворення та запалення є наслідком того, що частина палива надходить у циліндри у вигляді крапель, що не випарувалися, і не встигає згоріти. Проблема стає ще більш відчутнішою під час експлуатації автомобіля в міських умовах, що характеризуються частими зупинками й повторними пусками двигуна, а також короткими відрізками поїздок. Часті зупинки й повторні пуски двигуна особливо відчутні для гібридних автомобілів.

У процесі розвитку автомобільної техніки зазначену проблему намагалися вирішувати шляхом застосування різних технічних засобів. Проте використання додаткових термостатів, жалюзі радіатора, утеплення моторних відсіків, використання віскомуфт не відповідає підвищеним вимогам до експлуатаційних характеристик та екологічності двигуна. Одним з найефективніших методів вирішення вказаної проблеми є передпусковий підігрів двигуна, який здійснюється за допомогою спеціальних підігрівачів. Залежно від принципу дії передпускові підігрівачі розділяються на електричні підігрівачі від мережі 220 В, електричні підігрівачі 12 В, автономні підігрівачі (працюють на бензині чи дизелі), теплові акумулятори. Перераховані пристрої мають кожен свою низку переваг та недоліків, тим не менше одним з основних критеріїв їх працездатності є можливість досягнення рівномірної та достатньої для комфортного пуску температури головки та блоку циліндрів за прийнятний відрізок часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В роботах [1-4] розглянуто основні позиції щодо процесу передпускової підготовки двигунів внутрішнього згоряння. В роботах [5, 6] надано відомості щодо розробки та дослідження комбінованої системи підігріву двигунів і транспортних засобів (CHS). Екологічні аспекти використання теплоакумуляційної техніки вказані в [7,8]. Аспекти використання теплопідготовки в гібридних автомобілях (насамперед, Coolant Heat Storage System, CHSS) вказані в роботі [9]. Конструкції нових систем теплопідготовки описані в [10] та низці патентів, серед яких вкажемо [11-13]. Але з аналізу публікацій виявляється, що питанню нерівномірності розподілу температур двигуна в процесі теплової підготовки присвячено невелику кількість публікацій. З наявних відмітимо статтю [14,15]. Вказаний пробіл і обумовлює цілі даної статті.

Формулювання мети дослідження

З вказаного вище випливає формулювання мети дослідження: метою даної публікації є аналіз нерівномірності прогріву двигуна внутрішнього згоряння при теплової підготовці двигуна засобами теплоакумуляційної техніки за заданим режимом роботи та схемою подачі підігрітого антифризу засобами CFD моделювання.

Викладення основного матеріалу дослідження

Необхідність проведення CFD-розрахунків у дослідженні процесів передпускового прогріву двигунів внутрішнього згоряння обумовлена складністю теплових процесів, що відбуваються в системі охолодження та елементах двигуна. Традиційні експериментальні методи не завжди дозволяють точно визначити розподіл температури в різних зонах блоку циліндрів і головки, особливо на початкових етапах підігріву. Використання чисельного моделювання (CFD) дає змогу відтворити реальну картину руху теплоносія, оцінити локальні перепади температур і швидкості потоку, а також виявити ділянки із недостатнім прогрівом. Такий підхід забезпечує глибше розуміння механізмів теплообміну під час передпускової підготовки та дозволяє зробити висновки щодо придатності конструкції каналів охолодження до передпускової підготовки, надати перевагу тому чи іншому режиму циркуляції теплоносія та провести підлаштування параметрів теплоакумуляційної системи.

В якості розрахункової задачі було вибрано чотирьохциліндровий двигун внутрішнього згоряння (рис. 1). Розрахункова область була поділена на чотири зони: дві тверді – що відповідають блоку циліндрів і головці блока циліндрів, та дві проточні – для каналів охолоджувальної рідини в цих елементах. За рахунок різного згущення сіток для твердих доменів та проточних (проточні потребують значно більшої щільності сітки), вдалося знизити (у порівнянні з [15]) число скінченних об'ємів до 2 млн. Незалежність результатів від щільності сітки перевірили шляхом порівняння результатів розрахунків для одного з режимів на більш детальних і спрощених сітках. Поверхні проточних доменів вистилалися інфляцією призматичних комірок (рис. 2) із контролем параметра y^+ на поверхнях.

Окремим питанням є вибір моделі турбулентності для задачі. Для моделювання процесів теплообміну в системі охолодження під час передпускового підігріву двигуна була обрана $k-\epsilon$ модель турбулентності. Незважаючи на те, що режим течії характеризується турбулентністю з числами Рейнольдса, що не досягають $20\cdot 30\cdot 10^3$, ця модель залишається одним із найпоширеніших та перевірених підходів для технічних задач, пов'язаних із рухом рідин у складних геометріях. Вона забезпечує прийнятну точність опису поля швидкостей і температур при відносно помірних обчислювальних витратах, що робить її доцільним вибором на етапі порівняльного чи параметричного аналізу. Модель $k-\epsilon$ добре узгоджується з умовами течії в замкнених каналах системи охолодження, де

відбувається переважно усталений рух рідини. Її використання дозволяє коректно відтворити загальну картину розподілу швидкостей і температури, що є достатнім для оцінки рівномірності прогріву елементів блоку та головки циліндрів. При цьому було забезпечено контроль параметра y^+ у приконтактних областях для дотримання вимог застосування даної моделі.

Модель таким чином складалася з рівнянь нерозривності та руху для осереднених полів швидкостей та тиску при нестационарному русі

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{u} \right) = -\operatorname{grad} p^* + \operatorname{Div} \left(\nu_e \hat{\mathbf{d}} \right) + \mathbf{f}_V, \quad (2)$$

де

$$p^* = p + \frac{2}{3} \rho k, \quad d_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad \nu_e = \nu + \nu_t,$$

k – питома кінетична енергія турбулентності, $\text{м}^2/\text{с}^2$, ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини, $\text{м}^2/\text{с}$, ν_t – турбулентна в'язкість, $\text{м}^2/\text{с}$, p – осереднений тиск, Па, $\mathbf{u}$ – осереднений вектор швидкості, $\text{м}/\text{с}$, $\mathbf{f}_V$ – вектор масових сил, $\text{м}/\text{с}^2$, $\partial \mathbf{u} / \partial \mathbf{x}$ – тензор градієнтів швидкості, та додаткових рівнянь k - ε моделі

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla k = \nabla \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \varepsilon, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla \varepsilon = \nabla \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (4)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (5)$$

де ε – швидкість дисипації турбулентної енергії, $\text{м}^2/\text{с}^3$, $P_k = 2\nu_t \hat{\mathbf{d}} : \hat{\mathbf{d}}$ – генерація енергії.

Емпіричні константи в наведених рівняннях становлять:

$$C_\mu = 0.0845, \quad C_{1\varepsilon} = 1.42, \quad C_{2\varepsilon} = 1.68, \quad \sigma_k = \sigma_\varepsilon = 0.72.$$

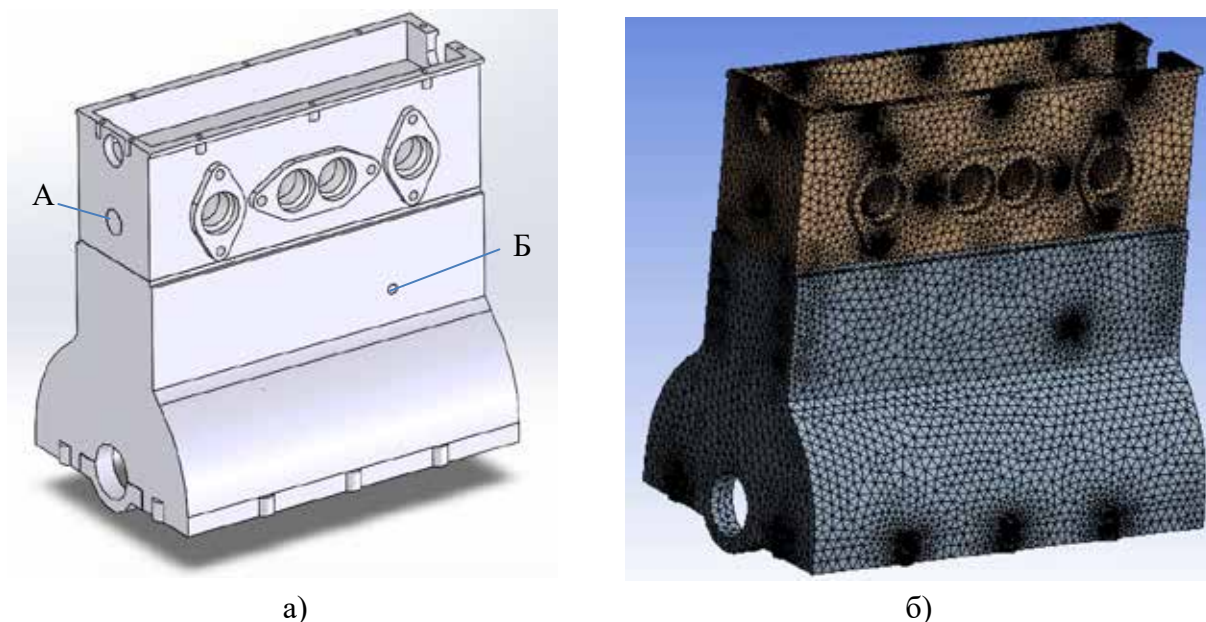


Рис. 1. CAD-модель двигуна (а) з вказаними патрубками подачі рідини (А) та виводу (Б) та сітка скінчених об'ємів (б)

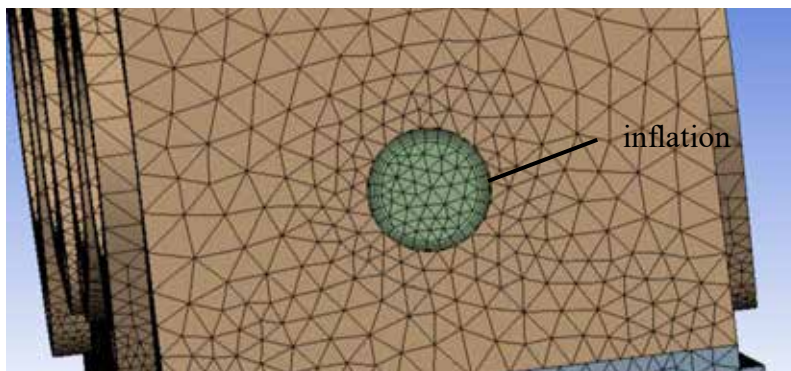
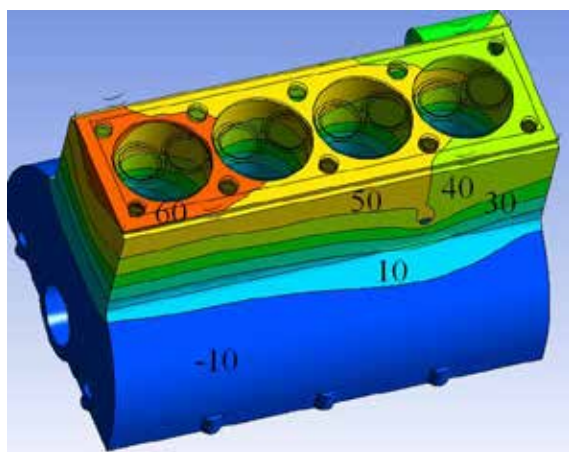
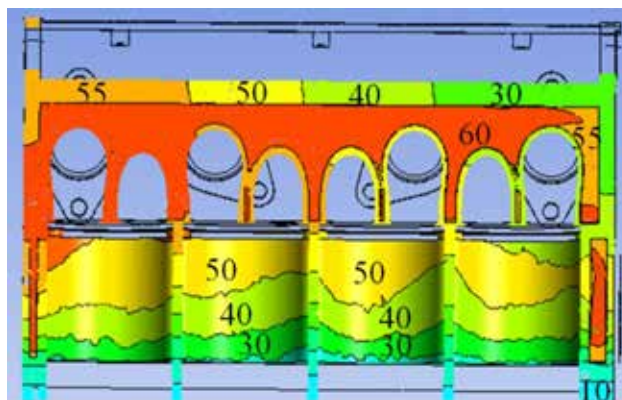


Рис. 2. Сітка скінченних об'ємів з шаром (inflation) призматичних комірок

На відміну від [15] подача рідини для теплової підготовки в схемі обігріву була проведена через випускний канал (позначено як А на рис. 1, а) з виходом через зливний патрубок охолоджуючої рідини (Б). Граничні умови для гідродинамічної задачі таким чином задають вхідну швидкість з перерахунку витрати 2 л/хв, та Outlet для зливного каналу. Граничні умови для теплової задачі включають температуру вхідної рідини 60 °С, для моделювання взаємодії між окремими зонами були встановлено: для межі тверде-рідина застосовано умову Conservative Interface Flux, для межі рідина-рідина – тип з'єднання General Connection, а для зовнішніх поверхонь твердих областей задано умову тепловіддачі. У відповідності з [15] коефіцієнт тепловіддачі α при природній конвекції визначався з критеріального рівняння $Nu = 0.75(Gr \cdot Pr)^{0.25}$, де Nu – критерій Нусельта, Gr – критерій Грасгофа, Pr – критерій Прандтля, звідки отримували $\alpha \approx 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$. Температура навколишнього середовища задавалась $t_0 = -10^\circ\text{C}$.



а)



б)

Рис. 3. Карта поля температур в блоці циліндрів (а) та в головці блоку циліндрів (б)

За результатами CFD-розрахунку далі аналізуються тепловий та гідродинамічний стан системи на момент часу, що відповідає 180-й секунді роботи теплооброблюючого пристрою. Такий часовий інтервал було обрано як характерний для завершення перехідного періоду нагріву, коли температура теплоносія та твердих елементів системи досягає квазівстановлених значень, та комфортний щодо самої процедури теплопідготовки для користувача. Отримані поля температур та лінії току наведено на рис. 3 та рис. 4 відповідно. Вони дають змогу оцінити як загальну ефективність процесу прогріву, так і локальні особливості розподілу температури в елементах двигуна.

З аналізу поля швидкостей видно, що течія рідини у внутрішніх каналах блоку й головки циліндрів є неоднорідною. Найбільш помітною є поява застійних зон у тих частинах системи, які розташовані протилежно до вхідного патрубку. У цих областях швидкість руху теплоносія істотно знижується, що, у свою чергу, призводить до зменшення інтенсивності теплопередачі між рідиною та стінками. В результаті формується нерівномірне температурне поле, що відображено на картах розподілу температури.

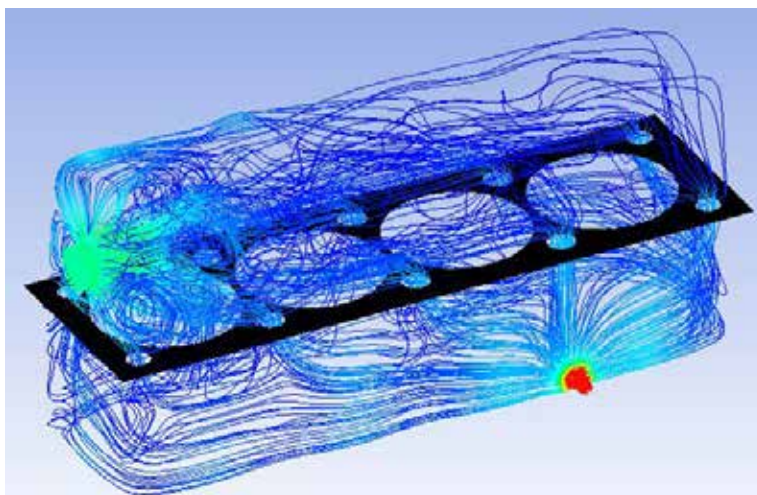


Рис. 4. Лінії току для циркуляції рідини при тепловій підготовці

Отримані результати підтверджують, що, як і зазначалося в роботі [15], прогрів окремих циліндрів відбувається з помітним градієнтом температур. Додатково виявлено нерівномірність температурного поля у головці блоку циліндрів: перепад температури між найбільш нагрітою та найхолоднішою її ділянками сягає близько 20°C. На поверхнях самих циліндрів ця різниця є ще більш вираженою – у межах 30-40°C. Такий характер розподілу температур може впливати на теплові деформації елементів та потенційно знижувати довговічність двигуна.

Треба також зазначити, що нижня частина картера двигуна практично не бере участі у процесі теплообміну під час розглянутого режиму теплової підготовки. Це свідчить про те, що прогрів здійснюється переважно у верхній частині двигуна, тоді як температурний вплив на зону картера є незначним. Таким чином, коректніше говорити не про повну теплову обробку двигуна, а лише про часткове прогрівання його основних елементів.

Окремим питанням є вибір відповідної помпи для забезпечення циркуляції в колі теплопідготовки. Загальний перепад тиску при тепловій обробці на двигуні становить 1657,82 Па. Вказані гідравлічні втрати розраховані без врахування патрубків та трубопроводів зовнішньої системи теплопідготовки та самого теплоаккумулятору, що потребує додаткових експериментальних даних або чисельних розрахунків.

Висновки

У результаті проведеного чисельного моделювання за рахунок високої інформативності CFD-аналізу при дослідженні процесів передпускової теплової підготовки двигунів внутрішнього згоряння отримані всебічні дані щодо гідравлічної та теплової складової процесу тепло підготовки чотирьохциліндрового двигуна внутрішнього згоряння. Отримані результати дали змогу комплексно оцінити просторовий розподіл температури та швидкості теплоносія в каналах системи охолодження, виявити зони нерівномірного прогріву, а також визначити вплив гідродинамічних особливостей потоку на ефективність теплопередачі. Циркуляція при теплопідготовці організована з входом через випускний клапан антифризу та виходом через зливний патрубок. Встановлено, що циркуляція рідини у складній геометрії каналів супроводжується утворенням застійних ділянок, особливо у зонах, віддалених від вхідного патрубка, що призводить до суттєвих температурних градієнтів у блоці та головці циліндрів. Така нерівномірність підтверджує необхідність ретельного підходу щодо вибору типу теплоакмулюючого пристрою та насосу з метою підвищення рівномірності теплового поля.

Проведений аналіз демонструє, що CFD-розрахунки є невід'ємним етапом комплексного моделювання повного циклу теплопідготовки двигуна. Вони забезпечують не лише кількісну оцінку теплових характеристик, але й дозволяють здійснювати інженерну перевірку доцільності застосування тих чи інших схем циркуляції, конфігурацій каналів або типів теплоаккумуляційних елементів. Такий підхід створює основу для раціонального вибору конструкції теплообмінного обладнання, підвищення енергоефективності системи підігріву та скорочення часу виходу двигуна на робочі температурні умови. Отримані результати можуть бути використані для подальшої розробки інтегрованих моделей, що описують повну роботу кола теплопідготовки двигуна – від накопичення теплоти до її передачі у ключові зони двигуна при запуску.

Список використаної літератури

1. Kim D. S., Park Y. J., Lee S. W. et al. A study on characteristics and control strategies of cold start operation for improvement of harmful exhaust emissions in SI engines//*Journal of Mechanical Science and Technology*. 2008. Vol. 22. P. 141–147. DOI: 10.1007/s12206-007-1017-6.

2. Anghelache G., Boriaru N. General Preheating System for Cold Starting of Internal Combustion Engine//*SAE Technical Paper* 940107. 1994. DOI: 10.4271/940107.
3. Stecki J., Cichocki W., Garbacik A., Szewczyk K. Heating Systems for Cold Starting of IC Engines//*SAE Technical Paper* 920002. 1992. DOI: 10.4271/920002.
4. Gabriel A. Study on the Possibility of Facilitating Internal Combustion Engine Starting at Very Low Temperatures//*SAE Technical Paper* 920038. 1992. DOI: 10.4271/920038.
5. Gritsuk I., Volkov V., Gutarevych Y., Mateichyk V., Verbovskiy V. Improving engine pre-start and after-start heating by using the combined heating system // *SAE Technical Paper* 2016-01-8071. 2016. DOI: 10.4271/2016-01-8071.
6. Gritsuk I. V. The Development and the Study of the Combined Heating System of Engines and Vehicles//*The Herald of Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2015. Vol. 70. P. 23–32.
7. Klets D., Gritsuk I., Makovetskyi A., Bulgakov N. et al. Information Security Risk Management of Vehicles//*SAE Technical Paper* 2018-01-0015. 2018. DOI: 10.4271/2018-01-0015.
8. Gritsuk I., Volkov V., Mateichyk V., Gutarevych Y. et al. The Evaluation of Vehicle Fuel Consumption and Harmful Emission Using the Heating System in a Driving Cycle//*SAE International Journal of Fuels and Lubricants*. 2017. Vol. 10, No. 1. P. 236–248.
9. Волков В. П., Грицук І. В., Володарець М. В., Погорлецький Д. С., Симоненко Р. В. Особливості дослідження теплоенергетичних характеристик теплоакуючого матеріалу для здійснення комбінованого прогріву гібридного транспортного засобу//*Наукові нотатки*. 2019. Вип. 65. С. 39–46. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2019_65_8.
10. Ключев О. І., Русанов С. А., Шатохіна І. А. Нові конструкції теплових акумуляторів для передпускової підготовки двигунів внутрішнього згорання автомобілів//*Вісник ХНТУ*. 2024. № 1(88). С. 41–48.
11. The system of coolant optimal temperatures in ICE: пат. 103729 Україна: МПК (2013.01) F01P 3/22, B60H 1/04, B60K 11/00 / Гутаревич Ю. Ф., Матейчик В. П., Грицук І. В., Волков В. П., Каграманян А. О., Комов П. Б., Комов О. Б., Поддубняк В. Ю., Сергієнко М. І., Краснокуцька З. І.; заявник і патентовласник Національний транспортний університет. № ua 103729; заявл. 30.10.2012; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7. 17 с. : іл.
12. Ключев О. І., Русанов С. А., Аппазов Е. С., Луняка К. В., Коновалов Д. В., Мацків Б. В. Тепловий акумулятор системи передпускового прогріву двигуна внутрішнього згорання: пат. на корисну модель № 137780 Україна: МПК F02N 15/00, F24H 7/00. Заявл. 03.04.2019; опубл. 11.11.2019, Бюл. № 21.
13. Луняка К. В., Ключев О. І., Русанов С. А., Ключева О. О., Коновалов Д. В. Тепловий акумулятор для передпускового прогріву двигуна внутрішнього згорання: пат. на корисну модель № 149067 Україна: МПК F02N 15/00, F24H 7/00. Заявл. 26.05.2021; опубл. 13.10.2021, Бюл. № 41.
14. Дмитрієв Д. О., Аппазов Е. С., Русанов С. А., Ключев О. І. Моделювання процесу розігріву двигуна з тепловим акумулятором при передпусковій підготовці//*Вісник Хмельницького національного університету*. 2015. № 5. С. 54–58.
15. Аппазов Е. С., Ключев О. І., Русанов С. А. Моделювання гідродинамічних та теплових процесів при передпусковій підготовці автомобільних двигунів// *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. Херсон: Вид-во ХДМА, 2014. № 1(10). С. 131–136.

References

1. Kim, D. S., Park, Y. J., Lee, S. W., et al. (2008). A study on characteristics and control strategies of cold start operation for improvement of harmful exhaust emissions in SI engines. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22, 141–147. <https://doi.org/10.1007/s12206-007-1017-6>
2. Anghelache, G., & Boriaru, N. (1994). General preheating system for cold starting of internal combustion engine. *SAE Technical Paper* 940107. <https://doi.org/10.4271/940107>
3. Stecki, J., Cichocki, W., Garbacik, A., & Szewczyk, K. (1992). Heating systems for cold starting of IC engines. *SAE Technical Paper* 920002. <https://doi.org/10.4271/920002>
4. Gabriel, A. (1992). Study on the possibility of facilitating internal combustion engine starting at very low temperatures. *SAE Technical Paper* 920038. <https://doi.org/10.4271/920038>
5. Gritsuk, I., Volkov, V., Gutarevych, Y., Mateichyk, V., & Verbovskiy, V. (2016). Improving engine pre-start and after-start heating by using the combined heating system. *SAE Technical Paper* 2016-01-8071. <https://doi.org/10.4271/2016-01-8071>
6. Gritsuk, I. V. (2015). The development and the study of the combined heating system of engines and vehicles. *The Herald of Kharkiv National Automobile and Highway University*, 70, 23–32.
7. Klets, D., Gritsuk, I., Makovetskyi, A., Bulgakov, N., et al. (2018). Information security risk management of vehicles. *SAE Technical Paper* 2018-01-0015. <https://doi.org/10.4271/2018-01-0015>
8. Gritsuk, I., Volkov, V., Mateichyk, V., & Gutarevych, Y. (2017). The evaluation of vehicle fuel consumption and harmful emission using the heating system in a driving cycle. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 10(1), 236–248.

9. Volkov, V. P., Hrytsuk, I. V., Volodarets, M. V., Pohorletskyi, D. S., & Symonenko, R. V. (2019). Osoblyvosti doslidzhennia teploenerhetychnykh kharakterystyk teploakumuluiuchoho materialu dlia zdiisnennia kombinovanoho prohrivu hibrydnogo transportnoho zasobu [Features of studying the thermal-energy characteristics of heat-accumulating material for combined heating of a hybrid vehicle]. *Naukovi Notatky*, 65, 39–46. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2019_65_8
10. Kliuiev, O. I., Rusanov, S. A., & Shatokhina, I. A. (2024). Novi konstruktsii teplovykh akumulatoriv dlia peredpuskovoï pidhotovky dvyhuniv vnutrishnoho zghoriannia avtomobiliv [New designs of thermal accumulators for pre-start preparation of internal combustion engines of vehicles]. *Visnyk KhNTU*, 1(88), 41–48.
11. Hutarievych, Yu. F., Mateichyk, V. P., Hrytsuk, I. V., Volkov, V. P., Kagramanian, A. O., Komov, P. B., Komov, O. B., Poddubniak, V. Yu., Serhiienko, M. I., & Krasnokutska, Z. I. (2013). *The system of coolant optimal temperatures in ICE* (Patent No. UA 103729). National Transport University. Filed October 30, 2012. Published April 10, 2013, Bulletin No. 7.
12. Kliuiev, O. I., Rusanov, S. A., Appazov, E. S., Luniaka, K. V., Konovalov, D. V., & Matskiv, B. V. (2019). *Teplovyi akumulator systemy peredpuskovoho prohrivu dvyhuna vnutrishnoho zghoriannia* [Thermal accumulator of the pre-start heating system of an internal combustion engine] (Utility Model Patent No. UA 137780). Filed April 3, 2019. Published November 11, 2019, Bulletin No. 21.
13. Luniaka, K. V., Kliuiev, O. I., Rusanov, S. A., Kliuieva, O. O., & Konovalov, D. V. (2021). *Teplovyi akumulator dlia peredpuskovoho prohrivu dvyhuna vnutrishnoho zghoriannia* [Thermal accumulator for pre-start heating of an internal combustion engine] (Utility Model Patent No. UA 149067). Filed May 26, 2021. Published October 13, 2021, Bulletin No. 41.
14. Dmytriiev, D. O., Appazov, E. S., Rusanov, S. A., & Kliuiev, O. I. (2015). Modeliuvannia protsesu rozihrovu dvyhuna z teplovym akumulatorom pry peredpuskovii pidhotovtsi [Modeling the process of engine heating with a thermal accumulator during pre-start preparation]. *Visnyk Khmelnytskoho Natsionalnoho Universytetu*, 5, 54–58.
15. Appazov, E. S., Kliuiev, O. I., & Rusanov, S. A. (2014). Modeliuvannia hidrodynamichnykh ta teplovykh protsesiv pry peredpuskovii pidhotovtsi avtomobilnykh dvyhuniv [Modeling of hydrodynamic and thermal processes during pre-start preparation of automotive engines]. *Naukovyi Visnyk Khersonskoi Derzhavnoi Morskoï Akademii*, 1(10), 131–136. Kherson: KhDMA Publishing.

Дата першого надходження рукопису до видання: 11.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 10.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

С. Л. СЕМІРНЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри проектування технічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-9304-3637

Ю. І. СЕМІРНЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних технологій
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-4230-4614

БРИКЕТУВАННЯ БАДИЛЛЯ КАРТОПЛІ ЯК СПОСІБ ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ

У статті розглянуто можливість використання бадилля картоплі як сировини для виробництва твердого біопалива. Україна входить до п'ятірки найбільших виробників картоплі у світі, тому щорічно утворюється значна кількість побічної біомаси, яка здебільшого не утилізується та спалюється на полях, що спричиняє екологічні втрати. Робота спрямована на визначення оптимальних параметрів процесу брикетування бадилля картоплі з метою отримання енергоефективного палива.

У ході дослідження проаналізовано фізико-механічні властивості бадилля: вологість, ламкість, густину, вміст лігніну. Встановлено, що воно містить 10–20% лігніну, який виконує роль природного зв'язуючого компонента, тому не потребує додаткових домішок. Експериментально визначено вплив основних технологічних факторів – вологості, ступеня подрібнення та тиску пресування – на якість отриманих брикетів.

Результати показали, що зниження вологості підвищує ламкість матеріалу, полегшуючи подрібнення, проте при вологості нижче 8% біомаса стає крихкою і пилить. Оптимальний діапазон вологості для пресування становить 8–12%. Найкращі показники досягаються при розмірі часток 5 мм і тиску пресування 100 МПа: щільність брикетів становить близько 1020 кг/м³, що відповідає промисловим стандартам твердого біопалива.

Отримані результати підтверджують доцільність залучення бадилля картоплі до біоенергетичних технологій. Реалізація запропонованої технології дозволить скоротити обсяги аграрних відходів, зменшити викиди парникових газів та підвищити енергетичну незалежність України, використовуючи місцеві відновлювані ресурси.

Ключові слова: бадилля картоплі, біомаса, брикетування, паливні брикети, щільність, енергоефективність, ступінь подрібнення, вологість, тиск пресування.

S. L. SEMIRNENKO

PhD (Engineering), Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Technical Systems Design
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-9304-3637

Y. I. SEMIRNENKO

PhD (Engineering), Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Technologies
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-4230-4614

BRIQUETTING OF POTATO HAULM AS A METHOD OF EFFECTIVE USE OF PLANT BIOMASS

The article investigates the potential of potato haulm as a raw material for the production of solid biofuels. Ukraine ranks among the world's top five potato producers, resulting in the generation of significant amounts of unused plant residues that are often burned in fields, causing environmental damage and energy loss. The research aims to determine optimal parameters for briquetting potato haulm to obtain energy-efficient solid fuel.

The physical and mechanical properties of potato haulm were analyzed, including moisture content, brittleness, density, and lignin concentration. It was found that the material contains 10–20% lignin, which serves as a natural binder,

eliminating the need for additional additives. Experimental studies determined the effect of moisture content, particle size, and pressing pressure on briquette density and quality.

Results showed that reducing moisture increases brittleness and facilitates grinding; however, excessive drying (<8%) leads to material fragility and dust formation. The optimal moisture range for briquetting was identified as 8–12%. The best results were obtained with a particle size of 5 mm and a pressing pressure of 100 MPa, achieving briquette density of about 1020 kg/m³, corresponding to industrial biofuel standards.

The findings confirm the feasibility of using potato haulm as a promising bioenergy feedstock. Implementation of the proposed briquetting technology will reduce agricultural waste, lower greenhouse gas emissions, and enhance Ukraine's energy independence through the use of renewable plant biomass.

Key words: potato haulm, biomass, briquetting, fuel briquettes, density, energy efficiency, particle size, moisture content, pressing pressure.

Постановка проблеми

Україна належить до п'яти найбільших виробників картоплі у світі. Середній обсяг її виробництва становить близько 22,5 млн т, причому понад 98% вирощується у господарствах населення [1, 2, 3]. Щорічно утворюються великі обсяги відходів – бадилля картоплі, яке часто спалюється на полях, що спричиняє забруднення атмосфери та втрату потенційного енергоресурсу.

Підвищення вартості енергоресурсів та необхідність скорочення викидів парникових газів стимулюють пошук нових видів твердого біопалива. Значна частина органічних відходів сільського господарства, зокрема бадилля картоплі, залишається невикористаною, хоча може бути ефективно перетворена на енергію.

Актуальним є створення технології, яка дозволить перетворити рослинні рештки на паливо, зокрема через процес брикетування.

Зростання вартості викопного палива та потреба у скороченні викидів парникових газів вимагають розвитку відновлюваних джерел енергії [4, 5].

Основні труднощі його використання:

- висока природна вологість (до 75% у свіжому стані);
- низька насипна густина (≈ 133 кг/м³);
- труднощі транспортування та зберігання.

Тому брикетування бадилля картоплі є доцільним шляхом його утилізації з перетворенням на енергоефективне паливо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження використання біомаси для енергетики активно проводяться в Інституті технічної теплофізики НАН України, а також у наукових установах НУБіП та КПІ.

Згідно з оцінками Гелетути О.Г. та Желізної Т.А., потенціал аграрної біомаси України перевищує 25 млн т у.п. на рік, з яких понад 30% становлять рослинні рештки [6, 7]. Башмакова Г.П. у своїй роботі [4] зазначає, що найбільш перспективними є технології брикетування та гранулювання як способи підвищення щільності біопалива. Митрофанов В.С. [8] та Козак І.І. [9] дослідили фізико-механічні властивості стеблової біомаси (соломи, гичі), визначивши параметри подрібнення і пресування. Дослідження Демко І. В., Морозов О. В., Кузнецов О. В. [10] присвячено оптимізації процесів брикетування соломи та лушпиння.

Разом із тим, бадилля картоплі вивчено недостатньо – відсутні комплексні дослідження його енергетичних характеристик, впливу вологості на міцність брикетів і параметрів екструзії.

Таким чином, подальші дослідження мають бути спрямовані на наукове обґрунтування технології брикетування бадилля картоплі як ефективного джерела біоенергії.

Формування мети дослідження

Метою дослідження є визначення оптимальних параметрів процесу брикетування бадилля картоплі (вологість, тиск, гранулометричний склад) і оцінка отриманих брикетів за щільністю, міцністю та теплотворною здатністю.

Викладення основного матеріалу дослідження

З урахуванням середнього співвідношення маси бадилля до бульб 48,5% [11, 12] річний потенціал утворення сухого бадилля становить близько 10 млн т, що еквівалентно понад 100 ПДж енергії при теплотворній здатності 10,8 МДж/кг.

У роботі нами були проаналізовані фізико-механічні властивості бадилля картоплі [13]:

- діаметр стебел 4–20 мм;
- довжину 60–90 см;
- густину в ущільненому стані 133 кг/м³;
- зусилля розриву 25 – 47 кг.

У таблиці 1 наведені орієнтовні дані по сухій масі бадилля картоплі.

Виявлено із таблиці 1, сира надземна маса картопляного бадилля містить 75–85% вологи, що характерно для свіжих рослинних решток. Наведений діапазон урожайності підтверджує, що бадилля картоплі має значний

потенціал для використання в енергетичних цілях. За сприятливих умов і високої агротехніки врожайність може сягати 50 т/га, що робить його перспективним для біоенергетичних технологій. В той же час показник сухої біомаси (3-10 т/га) є співставним із іншими польовими культурами, які використовуються як сировина для біоенергетики, що підтверджує можливість залучення картопляного бадилля до біоенергетичних систем (брикетування).

Таблиця 1

Орієнтовні дані по сухій масі бадилля картоплі

Показник	Орієнтовне значення
Вміст сухої речовини у свіжому бадиллі	15–25 %
Урожайність сирої надземної маси	20–40 т/га (іноді до 50 т/га у вологі роки)
Вихід сухої речовини з 1 га	3–10 т/га
Співвідношення сухої маси бадилля до сухої маси бульб	приблизно 1:2 – 1:4
Частка листків у сухій масі бадилля	40–50 %, решта – стебла

Суха надземна маса картоплі (бадилля) характеризується високим вмістом структурних вуглеводів – целюлози, геміцелюлози та лігніну. Ці компоненти визначають механічні властивості біомаси, зокрема її ламкість при різному рівні вологості.

Проведено дослідження з визначення ламкості бадилля картоплі залежно від вологості. Так, при високій вологості бадилля (>20–25%) – при збереженні природної або підвищеної вологості рослинні волокна залишаються еластичними. Вода діє як пластикатор, зменшуючи внутрішнє тертя між волокнами та підвищуючи гнучкість біомаси. При цій вологості стебла гнуться, не руйнуються, знижується пиловиділення, але подрібнення ускладнюється (ниткоподібні волокна “тягнуться”).

При помірній вологості (10–20%) бадилля починає втрачати еластичність, однак ще зберігає здатність до деформації без повного руйнування. Погіршення гнучкості підвищує крихкість, проте структура не стає повністю ломкою.

Як показали власні дослідження даної вологості можна досягнути за рахунок природної сушки на полі при сприятливих погодних умов чи досушування під навісами з вентиляцією.

При низькому рівні (<10%) вологи вода майже повністю видаляється з клітинних стінок, що призводить до:

- втрати зв'язків між целюлозними мікрофібрилами
- підвищення жорсткості й ламкості
- формування дрібних осколків і пилу при механічній обробці.

При даній вологості бадилля легко подрібнюється, утворюється значна кількість пилу, що потребує засобів пилоподавлення.

Вплив вологості на ламкість бадилля картоплі наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Вплив вологості на ламкість бадилля картоплі

Вологість, %	Характер стану матеріалу	Ламкість, %*	Коментар
5–8	повністю сухий	90–95	дуже крихке, пиління
10	пересушене	85	оптимально для подрібнення
12	стандарт зберігання	78	рівновага з навколишнім повітрям
15	сухе, але еластичність збільшується	65	падіння ефективності подрібнення
20	помірно вологе	45	гірше кришиться, підвищена енерговитрата
25	вологе	30	потребує попереднього підсушування
30	сире	10–15	практично не ламається

*Ламкість – умовний показник (% часток, що переходять у фракцію < 10 мм після подрібнення).

Графічно залежність ламкості бадилля картоплі від вологості представлена на рисунку 1.

Залежність ламкості бадилля картоплі від вологості можна представити у вигляді наступної формули:

$$B = 0,0193W^2 - 4,3955W + 126,71, \quad (1)$$

де B – ламкість стебел, %;

W – вологість, %.

Графік показує, що із зменшенням вологості бадилля картоплі зростає його ламкість. При вологості нижче 10% матеріал стає максимально крихким, що полегшує подрібнення, але підвищує пиловиділення.

Наступні дослідження були спрямовані на визначення вмісту лігніну у сухому бадиллі картоплі.

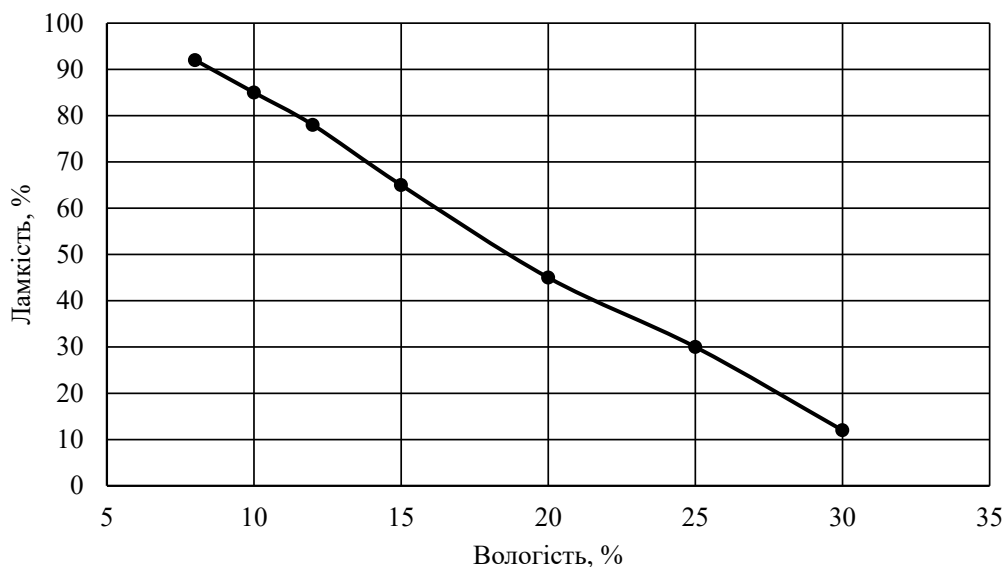


Рис. 1. Залежність ламкості бадилля картоплі від вологості

Лігнін є природним полімером, що входить до складу рослинної біомаси (солома, стебла, деревина тощо). Під час процесу брикетування він виконує ключову роль – природного в'язучого, завдяки чому можна формувати міцні брикети без додавання хімічних домішок [14]. Таким чином, чим більше лігніну міститься у біомасі, тим легше та ефективніше проходить процес брикетування, а отримані брикети мають вищу міцність і енергетичну цінність [15].

Проведені попередні дослідження показали, що середній вміст лігніну в сухому бадиллі картоплі знаходиться в межах 10-20% [16, 17]. Для порівняння, у таблиці 3 наведемо орієнтовний вміст лігніну деяких видів рослинної біомаси, що використовується у якості палива.

Таблиця 3

Вміст лігніну у соломі зернових культур та сухому бадиллі картоплі

Культура	Вміст лігніну, %
Пшениця (солома)	11–26
Ячмінь (солома)	14–20
Жито (солома)	15–19
Овес (солома)	17–22
Кукурудза (стебла/солома)	15–20
Рапс (солома)	15–18
Соя (стебла)	14–18
Сорго (стебла)	12–25
Гречка (солома)	15–19
Соняшник (стебла)	17–22
Рослинна біомаса/фракція	Орієнтовний вміст лігніну, % від сухої речовини
Пшенична солома (усі частини)	~ 16,5 %
Солома озимого ріпаку (стебло)	~ 22,9 %
Недеревна біомаса (узагальнено для рослин)	12-20 %
Бадилля картоплі	~ 10-20 %

Виявлено із таблиці 3, вміст лігніну в сухому бадиллі картоплі наближено такий, як у соломі більшості сільськогосподарських культур. Це дало можливість припустити, що даного відсотку лігніну достатньо для ефективного брикетування, а отримані брикети будуть мати достатню міцність та енергетичну цінність.

Подальші дослідження проводилися по визначенню впливу наступних показників бадилля картоплі на щільність брикетів: вологість, ступінь подрібнення та тиск пресування. Дослідження процесу брикетування проводилися на пресі RUF 400, розмір брикетів 150x60 мм.

На основі досліджень різних авторів по подрібненню біомаси сільськогосподарських культур з метою подальшого брикетування задаємось попередньо тиском пресування 100 МПа [14, 19, 20].

Ступінь подрібнення бадилля при дослідженнях по визначенню впливу вологості на щільність паливних брикетів приймали 5 мм.

Результати досліджень наведені на рисунку 2.

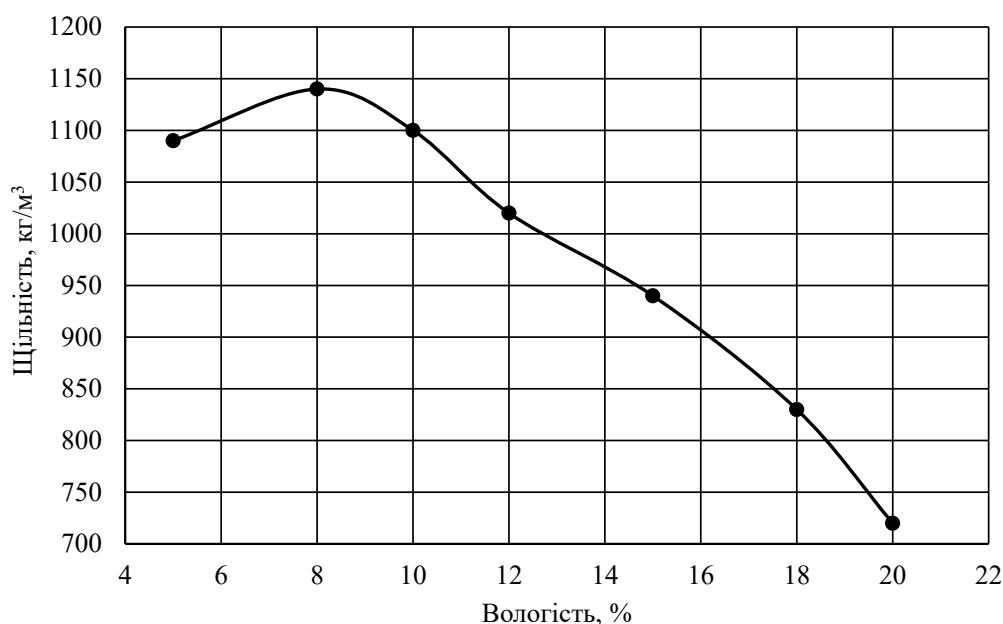


Рис. 2. Залежність щільності паливних брикетів від вологості бадилля картоплі

Встановлено з рис. 2, оптимальна зона вологості для сировини з бадилля картоплі знаходиться в межах 8–12%. У цьому діапазоні відбувається ефективне ущільнення, лігнін працює як природний зв'язуючий компонент, а внутрішня волога сприяє кращому контакту часток. При вологості менше 8% йде зменшення щільності брикетів, а при вологості 5% – брикети утворюються надто ламкі, при виході із преса наявні можливі мікротріщини. В той же час, при вологості 15% і більше брикети погано тримають форму, після охолодження з'являється розшарування та їх руйнування.

Залежність щільності паливних брикетів від вологості бадилля картоплі можна представити наступним виразом:

$$\rho = -2,1342W^2 + 27,147W + 1026,7 \quad (2)$$

де ρ – щільності паливних брикетів, кг/м³;

W – вологість бадилля картоплі.

Подальші дослідження по визначенню впливу розміру фракцій подрібненого бадилля на щільність паливних брикетів проводились при вологості 12%. Результати досліджень наведені на рисунку 3.

Із графіка (рис. 3) можна зробити висновки, що занадто великі частинки (>8 мм) – призводять до підвищеної пористості, слабкого їх зчеплення, низької щільності й міцності брикету. При розмірах часток <3 мм забезпечують високу щільність, але збільшують опір пресуванню, енерговитрати й зношування матриці. Оптимальна фракція для виготовлення брикетів буде становити 4–6 мм – дає найкраще співвідношення між механічними властивостями та енерговитратами. Приймаємо розмір фракції для брикетування – 5 мм. При цьому розмірі брикети мають достатню щільність (1020 кг/м³) та задовільну цілісність.

Залежність щільності паливних брикетів від ступеню подрібнення бадилля можна представити у вигляді наступного рівняння:

$$\rho = 0,6492l^2 - 66,071l + 1311,1 \quad (3)$$

де l – розмір фракції, мм.

Дослідження по визначенню впливу тиску пресування на щільність брикетів проводилися при вологості бадилля картоплі 12% та розміру часток після подрібнення 5 мм. Діапазон проведення досліджень був у межах від 40 до 120 МПа (рис. 4).

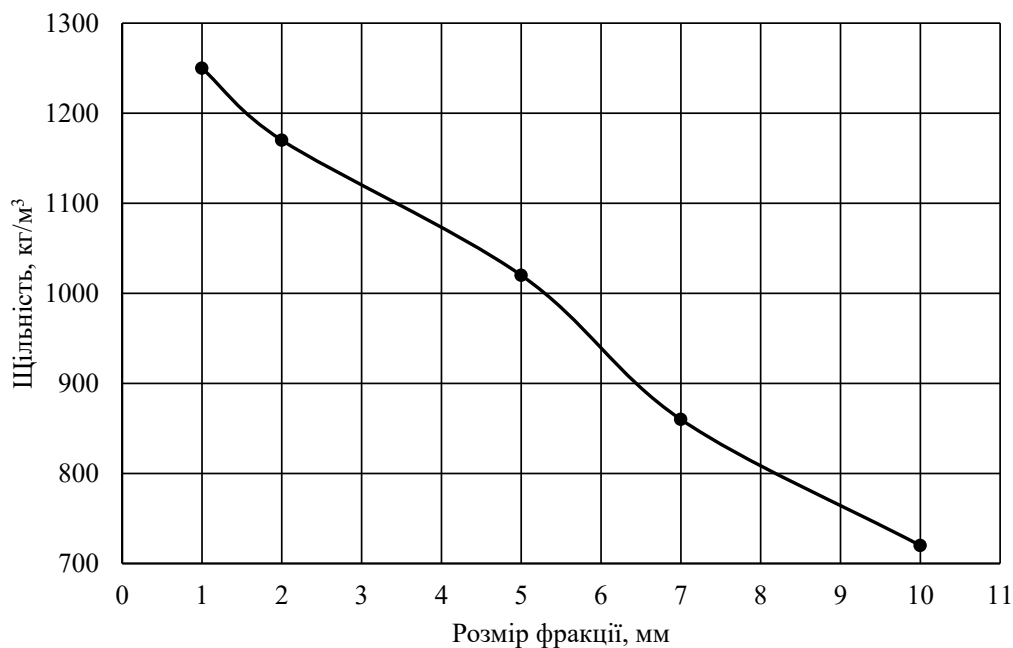


Рис. 3. Залежність щільності паливних брикетів від ступеню подрібнення бадилля картоплі

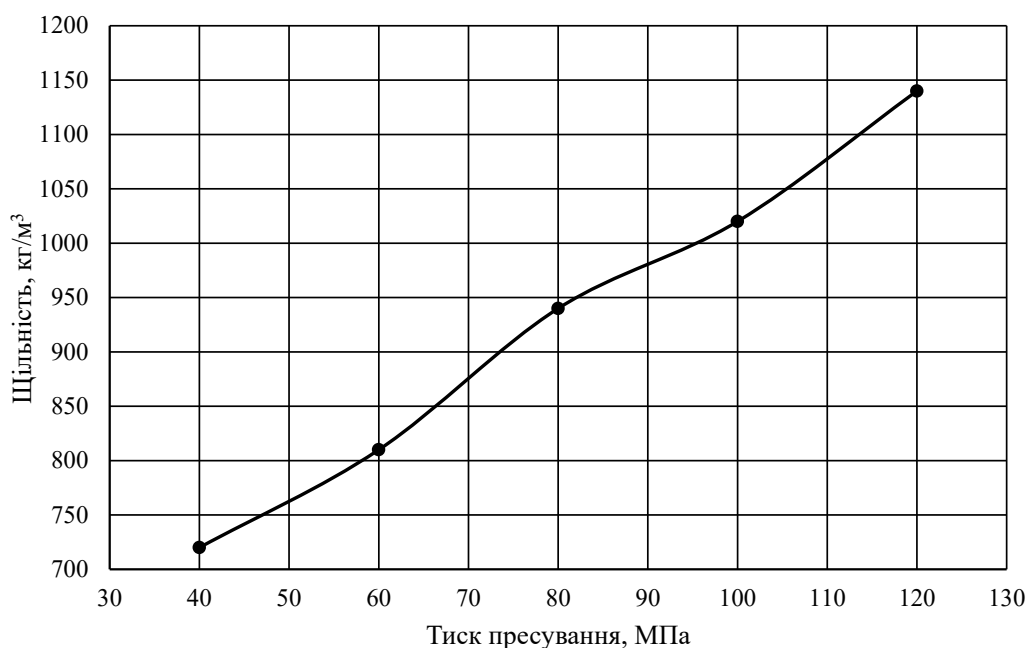


Рис. 4. Залежність щільності паливних брикетів від тиску пресування подрібненого бадилля картоплі

За результатами досліджень видно, що при тиску пресування 40 МПа брикети утворюються слабкі, мають високу пористість, не держать форму. При щільності 60 МПа брикети тримають форму, мають високу пористість, крихкість і низьку транспортабельність. Брикети, що утворилися при тиску пресування 80 МПа мають стійку структуру, оптимальну адгезію частинок, але не високу цілісність. При тиску пресування 100 МПа брикети утворюються із стійкою структурою, високою якістю. Подальше підвищення тиску до 120 МПа забезпечує високу щільність і міцність, але призводить до збільшення енергоспоживання та зносу преса. Тому приймаємо за компроміс «ефективність/енерговитрати» тиск пресування 100 МПа.

Залежність щільності паливних брикетів від тиску пресування наближено можна виразити за допомогою даного рівняння:

$$\rho = 0,0018P^2 + 4,9643P + 516 \quad (4)$$

де P – тиск пресування, МПа.

Висновки

Бадилля картоплі є перспективною сировиною для виробництва паливних брикетів. Оптимальними умовами процесу є вологість 8–12%, розмір часток 5 мм та тиск пресування 100 МПа. Реалізація технології дозволить зменшити обсяги аграрних відходів, скоротити викиди парникових газів і підвищити енергетичну незалежність України.

Список використаної літератури

1. Шпичак О. М., Прокопенко К. О. Проблеми та перспективи розвитку ринку картоплі в Україні з урахуванням економічних викликів // *Економіка та суспільство*. 2020. № 23. Режим доступу: [вставити повне посилання] (дата звернення: [вказати дату]).
2. Міністерство аграрної політики та продовольства України. Основні показники виробництва картоплі в Україні : статистичний звіт. Київ : Мінагрополітики, 2023.
3. FAOSTAT. *Potato Production in Ukraine* [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.fao.org/faostat> (дата звернення: 12.11.2025). Назва з екрана.
4. Башмакова Г. П. Використання аграрної біомаси як джерела відновлюваної енергії // *Енергетика та електрифікація*. 2019. № 3. С. 20–25.
5. Geletukha G., Zheliezna T. Bioenergy in Ukraine: Current state and prospects // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2021. Vol. 11, Iss. 4. P. 1545–1558.
6. Гелетуха О. Г., Желєзна Т. А. Потенціал біомаси для енергетики в Україні. Київ : ІТТФ НАН України, 2020.
7. Гелетуха О. Г., Башмакова Г. П. Перспективи використання твердого біопалива в Україні // *Вісник НАН України*. 2018. № 10. С. 55–60.
8. Митрофанов В. С. Дослідження характеристик бадилля картоплі для визначення технологічних режимів переробки // *Вісник аграрної науки*. 2016. № 9. С. 80–85.
9. Козак І. І., Литвиненко В. М. Фізичні властивості бадилля картоплі // *Сільськогосподарські машини*. 2017. № 1. С. 15–20.
10. Демко І. В., Морозов О. В., Кузнецов О. В. Оптимізація процесу брикетування відходів соломи в присутності подрібненого лушпиння соняшника // *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2018. Вип. 8, т. 2. С. 27–35. Режим доступу: [вказати повне посилання] (дата звернення: [дата]).
11. Bashmakova H. P. The development of biomass briquetting in Eastern Europe // *Renewable Energy Review*. 2020. Vol. 15. P. 120–135.
12. Das S. K. et al. Potato (*Solanum tuberosum* L.) seed tuber production as influenced by haulm cutting at optimum date [Електронний ресурс] // *CAB Digital Library*. 2020. Режим доступу: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20203573540> (дата звернення: 12.11.2025).
13. Paiziev G. K. Physical and mechanical properties of potato culture (tops and tubers) [Електронний ресурс]. 2021. Vol. 2, Iss. 8. Режим доступу: <https://agir.academiascience.org/index.php/agir/article/download/386/352/725> (дата звернення: 12.11.2025).
14. Kaliyan N., Morey R. V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products // *Biomass and Bioenergy*. 2009. Vol. 33, Iss. 3. P. 337–359.
15. Marreiro H. M. P. et al. Empirical studies on biomass briquette production: a literature review // *Energies*. 2021. Vol. 14, Iss. 24. P. 8320. DOI: 10.3390/energies14248320.
16. Alaru M. et al. Lignin content and briquette quality of different fibre hemp and energy sunflower plants // *Fuel Processing Technology*. 2011. Vol. 92, Iss. 2. P. 235–240.
17. Comparative analysis of lignocellulosic residues: energy content and ash composition // *Bioresource Technology*. 2020. Vol. 301. Art. 122780.
18. Лук'яненко О. М., Лук'яненко В. М. Аналіз віброударного пресування рослинної маси з уточненням математичної моделі процесу // *Наукові праці : зб. наук. пр.* Київ : ХНТУ, 2018. Вип. 28. С. 54–61.
19. Семірненко С. Л., Семірненко Ю. І. Брикетування соломи як альтернатива сільськогосподарським спалюванням // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства : технічний сервіс машин для рослинництва*. 2013. Вип. 134. С. 271–275.
20. Mani S., Tabil L. G., Sokhansanj S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets // *Biomass and Bioenergy*. 2006. Vol. 30. P. 648–654.

References

1. Shpychak, O. M., & Prokopenko, K. O. (2020). Problems and prospects for the development of the potato market in Ukraine considering economic challenges. *Economy and Society*, (23). [URL if available] (in Ukrainian).

2. Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine. (2023). *Statistical report "Main indicators of potato production in Ukraine"*. Kyiv, Ukraine. (in Ukrainian).
3. FAOSTAT. (2025, November 12). *Potato production in Ukraine*. Retrieved from <https://www.fao.org/faostat>
4. Bashmakova, H. P. (2019). Use of agricultural biomass as a source of renewable energy. *Energy and Electrification*, (3), 20–25. (in Ukrainian).
5. Geletukha, G., & Zheliezna, T. (2021). Bioenergy in Ukraine: Current state and prospects. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 11(4), 1545–1558. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00961-0>
6. Geletukha, O. G., & Zheliezna, T. A. (2020). *Biomass potential for energy in Ukraine*. Kyiv: Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine. (in Ukrainian).
7. Geletukha, O. G., & Bashmakova, H. P. (2018). Prospects for the use of solid biofuels in Ukraine. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (10), 55–60. (in Ukrainian).
8. Mytrofanov, V. S. (2016). Study of the characteristics of potato haulm to determine technological processing modes. *Bulletin of Agricultural Science*, (9), 80–85. (in Ukrainian).
9. Kozak, I. I., & Lytvynenko, V. M. (2017). Physical properties of potato haulm. *Agricultural Machines*, (1), 15–20. (in Ukrainian).
10. Demko, I. V., Morozov, O. V., & Kuznetsov, O. V. (2018). Optimization of the straw waste briquetting process in the presence of crushed sunflower husk. *Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University*, 8(2), 27–35. [URL if available] (in Ukrainian).
11. Bashmakova, H. P. (2020). The development of biomass briquetting in Eastern Europe. *Renewable Energy Review*, 15, 120–135.
12. Das, S. K., et al. (2020). Potato (*Solanum tuberosum* L.) seed tuber production as influenced by haulm cutting at optimum date. *CAB Digital Library*. Retrieved from <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20203573540>
13. Paiziev, G. K. (2021). Physical and mechanical properties of potato culture (tops and tubers). *Agricultural Innovations and Research*, 2(8). Retrieved from <https://agir.academiascience.org/index.php/agir/article/download/386/352/725>
14. Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>
15. Marreiro, H. M. P., et al. (2021). Empirical studies on biomass briquette production: A literature review. *Energies*, 14(24), 8320. <https://doi.org/10.3390/en14248320>
16. Alaru, M., et al. (2011). Lignin content and briquette quality of different fibre hemp and energy sunflower plants. *Fuel Processing Technology*, 92(2), 235–240. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.09.003>
17. Comparative analysis of lignocellulosic residues: Energy content and ash composition. (2020). *Bioresource Technology*, 301, 122780. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122780>
18. Lukianenko, O. M., & Lukianenko, V. M. (2018). Analysis of vibro-impact pressing of plant mass with clarification of the mathematical model of the process. *Scientific Works: Collection of Scientific Papers*, (28), 54–61. Kyiv: KNTU. (in Ukrainian).
19. Semirnenko, S. L., & Semirnenko, Yu. I. (2013). Straw briquetting as an alternative to agricultural burning. *Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture: Technical Service of Machines for Crop Production*, (134), 271–275. (in Ukrainian).
20. Mani, S., Tabil, L. G., & Sokhansanj, S. (2006). Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets. *Biomass and Bioenergy*, 30, 648–654. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.01.004>

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

Ю. І. СЕМІРНЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних технологій
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-4230-4614

С. Л. СЕМІРНЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри проектування технічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-9304-3637

ОПТИМІЗАЦІЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗЕРНОЗБИРАЛЬНИХ КОМБАЙНІВ У МАЛИХ АГРОПІДПРИЄМСТВАХ

Раціональна організація транспортно-технологічних процесів під час збирання врожаю зернових культур є одним із ключових чинників підвищення ефективності виробництва у сільському господарстві. Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах малих агропідприємств, що мають обмежений машинно-тракторний парк і площі до 500 га. У статті розглянуто науково-методичні підходи до оптимізації транспортно-технологічного обслуговування зернозбиральних комбайнів з урахуванням сучасних технічних і логістичних рішень. Метою дослідження є обґрунтування раціональної схеми взаємодії комбайнів, транспортних засобів і проміжних ланок (перевантажувачів зерна) для забезпечення безперервності процесу збирання та мінімізації простоїв техніки.

Методика досліджень включала аналітичні та експериментальні методи, хронометражні спостереження й математичне моделювання. Проведено порівняльний аналіз двох технологічних схем – прямих перевезень і перевезень із використанням перевантажувачів зерна. Встановлено, що впровадження проміжної ланки забезпечує зниження простоїв комбайнів на 60–70%, підвищення коефіцієнта використання машинного часу до 0,9–0,92 та зростання продуктивності комплексу на 13–16%. Застосування перевантажувачів сприяє також зменшенню питомих енерговитрат на 10–12% і зниженню ущільнення ґрунту на 35–40%, що позитивно впливає на екологічний стан полів.

Розроблена модель узгодження роботи елементів збирально-транспортної системи може бути використана для планування технологічних процесів у малих агропідприємствах України. Отримані результати підтверджують доцільність впровадження системи «комбайн – перевантажувач – транспорт» як ефективного інструменту оптимізації збиральної логістики.

Ключові слова: зернозбиральний комбайн, транспортне обслуговування, агрологістика, перевантажувач, мале агропідприємство, оптимізація, продуктивність.

YU. I. SEMIRNENKO

PhD (Engineering), Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Technologies
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-4230-4614

S. L. SEMIRNENKO

PhD (Engineering), Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Technical Systems Design
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-9304-3637

OPTIMIZATION OF TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL SERVICING OF GRAIN HARVESTERS IN SMALL AGRICULTURAL ENTERPRISES

Rational organization of transport and technological processes during grain harvesting is one of the key factors in improving agricultural production efficiency. This problem is especially relevant for small agricultural enterprises with limited machinery resources and cultivated areas of up to 500 hectares. The article presents scientific and methodological

approaches to optimizing the transport and technological servicing of grain harvesters, taking into account modern technical and logistic solutions. The purpose of the study is to substantiate a rational scheme of interaction between harvesters, transport vehicles, and intermediate links (grain auger wagons) to ensure continuity of the harvesting process and minimize equipment downtime.

The research methodology included analytical and experimental methods, time studies, and mathematical modeling. A comparative analysis of two technological schemes – direct transportation and transportation using grain transfer vehicles – was carried out. It was established that the introduction of an intermediate link reduces harvester downtime by 60–70%, increases the coefficient of machine time utilization up to 0.9–0.92, and raises the complex productivity by 13–16%. The use of grain auger wagons also reduces specific energy consumption by 10–12% and soil compaction by 35–40%, which has a positive environmental effect.

The developed synchronization model of the harvesting and transport system elements can be applied in planning technological processes in small Ukrainian farms. The obtained results confirm the feasibility of implementing the “harvester – grain transfer vehicle – transport” system as an effective tool for optimizing harvesting logistics.

Key words: combine harvester, transport service, agrolistics, loader, small agricultural enterprise, optimization, productivity.

Постановка проблеми

Рациональна організація транспортно-технологічних процесів під час збирання врожаю зернових культур є одним із ключових факторів підвищення ефективності виробництва в агропромисловому комплексі. В умовах малих агропідприємств, що мають обмежений парк техніки та площі до 500 га, питання мінімізації втрат часу та ресурсів набуває особливого значення.

Основною умовою зменшення втрат урожаю під час жнив є дотримання оптимальних строків збирання. Проте значна частка втрат і простоїв техніки виникає не під час безпосереднього процесу обмолоту, а внаслідок неефективної організації транспортування зерна від комбайна до місць зберігання чи переробки.

Досвід українських та зарубіжних агропідприємств свідчить, що до 30–40% робочого часу зернозбиральних комбайнів може витрачатися на очікування транспортних засобів. Це призводить до зниження продуктивності, зростання експлуатаційних витрат і ризику перевищення агротехнічних термінів збирання.

Одним із шляхів вирішення проблеми є впровадження систем транспортно-технологічного обслуговування, які забезпечують безперервність процесу збирання – шляхом застосування проміжних транспортних ланок, таких як перевантажувачі зерна. Ці машини створюють гнучкий логістичний зв'язок між комбайнами й автомобілями, даючи змогу уникати простоїв і зменшувати тиск на ґрунт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні наукові дослідження в галузі транспортних технологій у сільському господарстві спрямовані на пошук ефективних рішень щодо організації транспортування врожаю від місця збирання до зберігання чи переробки. Основну увагу приділено зниженню витрат пального, зменшенню простоїв техніки та оптимізації використання транспортних засобів.

За даними Мельника В. П. [1], Бойка І. М. [2], Погорілого П. О. [3] і Тарасенка О. Г. [4] та ефективність процесу збирання зернових культур на 25–30% залежить від організації логістичного забезпечення комбайнів. У разі несвочасного прибуття транспортного засобу на вивантаження комбайн простоє, втрачаючи продуктивність.

Гаврилюк С. В. [5] та підкреслює, що в господарствах із площею менше 500 га найчастіше використовується схема прямих перевезень, коли зерно транспортують безпосередньо з поля автомобілями. Така система проста в реалізації, однак характеризується низькою ефективністю використання комбайнів через несинхронність їхньої роботи з транспортом.

Наукові праці Нефьодова В. М. [6], Євтушенка С. О. [7], Шкури А. М. [8], Дрозда І. С. [9], Ігнатенка, І. І., Стадника, П. М. [10] та Василенка, В. О. і Гнатенка О. П. [11] присвячені вивченню застосування проміжних ланок – перевантажувачів зерна, які дозволяють усунути простої комбайнів. У їхніх дослідженнях показано, що використання перевантажувачів підвищує ефективність збирання на 12–20%, зменшує ущільнення ґрунту та дає змогу використовувати вантажні автомобілі більшої вантажопідйомності без заїзду в поле.

Міжнародні дослідження, зокрема роботи, Sikora J. [12], Fulton J., Porter W. і Smith L. [13], показують, що у фермерських господарствах США та Канади застосування перевантажувальних систем дозволяє скоротити загальний час збору на 15–18%, а паливні витрати – до 10%.

В Україні аналогічні результати підтверджені експериментами, проведеними у Національному університеті біоресурсів і природокористування України (НУБіП) [14]. Вчені встановили, що при використанні перевантажувачів типу БНП-20 продуктивність комбайнів зростає на 8–14%, а простої транспорту скорочуються в середньому на 2–3 години за зміну.

Таким чином, огляд літератури свідчить, що існує два базові підходи до організації транспортування зерна:

1. Схема прямих перевезень, яка характерна простотою, але неефективністю в умовах обмежених транспортних ресурсів.

2. Схема з проміжною ланкою, що забезпечує більш гнучку та безперебійну роботу комплексу «комбайн – транспорт».

У більшості сучасних досліджень рекомендовано впроваджувати саме другу схему для господарств малого та середнього рівня. Проте відсутність системного підходу до вибору оптимальних параметрів технічних засобів (місткість перевантажувача, кількість комбайнів, дистанція транспортування тощо) потребує подальшого дослідження, яке й здійснюється в цій роботі.

Формування мети дослідження

Мета статті – науково обґрунтувати й визначити раціональний спосіб транспортно-технологічного обслуговування зернозбиральних комбайнів у малих агропідприємствах України з урахуванням сучасних технічних і логістичних підходів.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- провести аналіз існуючих способів транспортування зерна з поля;
- визначити основні фактори, що впливають на вибір схеми обслуговування комбайнів;
- виконати порівняльні розрахунки ефективності різних схем;
- обґрунтувати вибір оптимальної технології для малих господарств;
- розробити практичні рекомендації щодо впровадження запропонованих рішень.

Викладення основного матеріалу дослідження

Теоретичні основи оптимізації транспортно-технологічного обслуговування. Ефективність збирання зернових культур визначається взаємодією трьох основних елементів технологічного процесу:

- комбайна як засобу первинного збору та обмолоту;
- транспортних засобів для вивезення зерна;
- організаційної схеми взаємодії між ними.

Невідповідність у роботі цих елементів призводить до простоїв, перевантажень або недовантажень техніки, що знижує загальну продуктивність комплексу. Для усунення цих недоліків необхідно розробити оптимальну систему обслуговування, у якій узгоджені параметри часу, обсягів і маршрутів руху машин.

Теоретичні передумови оптимізації. Відомо, що повний цикл роботи зернозбирального комбайна складається з таких етапів:

- намолот зерна (робочий хід);
- вивантаження зерна у транспортний засіб або проміжну ємність;
- очікування транспорту (у разі відсутності синхронізації);
- переїзд до наступної ділянки поля.

Тривалість кожного з етапів визначає продуктивність (Q_k) комбайна (т/год), що можна записати як:

$$Q_k = \frac{Y \cdot B \cdot V}{10000}, \quad (1)$$

де Y – урожайність культури, т/га;

B – робоча ширина захвату жатки, м;

V – робоча швидкість руху, км/год.

Загальна тривалість одного циклу роботи комбайна t_c включає час на збирання t_z , вивантаження t_v і простої t_p :

$$t_c = t_z + t_v + t_p, \quad (2)$$

Оптимізація процесу передбачає мінімізацію часу простоїв t_p при забезпеченні максимальної використаної місткості транспортних засобів.

Модель узгодження роботи комбайна і транспорту. Для забезпечення безперервної роботи комбайна необхідно, щоб до моменту заповнення його бункера транспортний засіб або перевантажувач були готові до приймання зерна.

Нехай час намолоту повного бункера t_b , а час повного транспортного циклу автомобіля t_t . Для відсутності простоїв виконується умова:

$$t_c \leq n \cdot t_z, \quad (3)$$

де n – кількість транспортних засобів, закріплених за одним комбайном.

Якщо $t_t > n \cdot t_b$, виникають простоя комбайна. Якщо ж $t_t < n \cdot t_b$, простоє транспорту. Таким чином, існує оптимальне співвідношення між кількістю комбайнів і транспортних одиниць:

$$K_{opt} = \frac{t_t}{t_b}, \quad (4)$$

де K_{opt} – коефіцієнт оптимального співвідношення.

При $K_{opt} = 1$ досягається повна синхронізація.

Використання проміжної ланки як способу синхронізації. У практичних умовах малих господарств використання проміжної ланки (перевантажувача зерна) дозволяє зняти обмеження, накладені різницею у тривалості циклів роботи комбайна і транспорту.

Перевантажувач виступає буфером, який накопичує зерно від кількох комбайнів і вивантажує його в автомобіль великої вантажопідйомності поза межами поля.

Схематично процес можна представити як дворівневу систему:

1. Комбайн → Перевантажувач (вивантаження під час руху);
2. Перевантажувач → Автомобіль (вивантаження на краю поля).

Тривалість циклу роботи перевантажувача визначається:

$$t_{\text{ци}} = t_{\text{зб}} + t_{\text{пер}} + t_{\text{вив}} \quad (5)$$

де $t_{\text{зб}}$ – час завантаження зерна від комбайнів;

$t_{\text{пер}}$ – час переїзду між комбайнами;

$t_{\text{вив}}$ – час вивантаження у транспортний засіб.

Завдяки цьому усуваються простої комбайнів, оскільки вивантаження здійснюється «на ходу».

Розрахунок ефективності використання перевантажувача. Припустимо, що один перевантажувач обслуговує два комбайни з продуктивністю $Q_k = 6,1$ т/год і бункером $V_b = 4,2$ м³.

Час намолоту одного бункера становить $t_b = 33$ хв.

Об'єм перевантажувача – $V_n = 22$ м³.

Максимальна кількість бункерів, які може прийняти перевантажувач:

$$N_b = \frac{V_n}{V_b}, \quad (6)$$

$$N_b = \frac{22}{4,2} \approx 5,2,$$

тобто 5 бункерів.

Час одного циклу роботи перевантажувача (завантаження, переїзди, вивантаження) – $t_{\text{ци}} = 60$ хв.

Коефіцієнт використання перевантажувача:

$$K_v = \frac{V_{\phi}}{V_n}, \quad (7)$$

$$K_v = \frac{21,8}{22,0} = 0,99,$$

що свідчить про майже повне завантаження об'єму перевантажувача та ефективну роботу комплексу.

Методи досліджень. Дослідження виконано на основі аналітичних, експериментальних і порівняльних методів із використанням вимірювальної апаратури та чисельного моделювання.

Загальна методика. Малі агропідприємства з площею ріллі 100–500 га, що використовують зернозбиральні комбайни середньої потужності (типу Claas Tucano, John Deere T550 або їх вітчизняні аналоги).

Визначення базових параметрів. Продуктивність комбайна, місткість бункера, урожайність, довжина гону, швидкість транспорту, відстань перевезення.

Порівняння двох технологічних схем.

Схема А – прямі перевезення;

Схема Б – із проміжною ланкою (перевантажувачем зерна).

Хронометражні спостереження. Визначення часу на вивантаження, переїзди, простої, завантаження транспорту.

Математичне моделювання. Розрахунок коефіцієнтів використання машинного часу (K_i) і об'єму кузова (K_v).

Коефіцієнт використання машинного часу:

$$K_i = \frac{t_{\text{роб}}}{t_{\text{зм}}}, \quad (8)$$

де $t_{\text{роб}}$ – ефективний час роботи комбайна (збирання + вивантаження),

$t_{\text{зм}}$ – тривалість зміни (12 годин).

Експериментальні умови. Дослідження проведено на полі пшениці з урожайністю 4,4 т/га у господарстві площі 250 га (Сумська область).

Було випробувано такі варіанти комплектації (табл. 1).

Таблиця 1

Варіанти комплектації

№	Склад збирально-транспортного агрегату	Об'єм кузова, м³	Кількість комбайнів	Спосіб обслуговування
1	1 комбайн + 2 автомобілі	5,1	1	Прямі перевезення
2	2 комбайни + 1 автомобіль	10,1	2	Прямі перевезення
3	2 комбайни + трактор + перевантажувач БНП-20	22,0	2	Із проміжною ланкою

Для кожного варіанту вимірювався: фактичний час простою комбайнів і транспорту; кількість рейсів за зміну; коефіцієнти завантаження кузова; тривалість повного циклу обслуговування.

Результати досліджень. Результати експериментальних випробувань свідчать, що схема транспортно-технологічного обслуговування з використанням проміжної ланки – перевантажувача зерна – є суттєво ефективнішою порівняно з прямими перевезеннями.

Основні показники ефективності подано в табл. 2.

Таблиця 2

Порівняльні результати роботи збирально-транспортних комплексів

Показник	Схема А (прямі перевезення)	Схема Б (з перевантажувачем)	Відхилення, %
Продуктивність комбайнів, т/год	5,8	6,6	+13,8
Коефіцієнт використання машинного часу, K_t	0,79	0,91	+15,2
Середній час простою комбайна, хв/зм	128	42	-67,2
Середній час простою транспорту, хв/зм	95	64	-32,6
Витрата пального на 1 т зерна, л	1,27	1,12	-11,8
Продуктивність комплексу, га/зміну	22,1	25,6	+15,8

Як видно з таблиці 2, застосування перевантажувача дозволяє зменшити простої комбайнів майже у три рази та підвищити ефективність використання машинного часу на 15%. Зростання продуктивності комплексу в межах 13 – 16% підтверджує доцільність використання даної технологічної схеми в малих господарствах.

Енергетичні показники. Розрахунок питомих енерговитрат здійснювався за формулою:

$$E = \frac{G_p}{Q_c}, \quad (9)$$

де E – питомі енерговитрати, л/т;

G_p – сумарна витрата пального комбайном і транспортом, л;

Q_c – обсяг перевезеного зерна, т.

Для схеми Б питомі енерговитрати становили 1,12 л/т, що на 11,8% менше, ніж для схеми А. Це пояснюється зменшенням кількості заїздів автомобілів у поле та оптимальнішими маршрутами руху.

Екологічні та експлуатаційні аспекти. Застосування перевантажувачів зерна позитивно впливає на агро-екологічний стан полів. Оскільки вантажні автомобілі не заїжджають на ріллі, ущільнення ґрунту знижується на 35–40%, що покращує водно-повітряний режим і підвищує врожайність наступних культур на 2–3%.

Крім того, скорочення кількості переїздів транспорту зменшує витрати пального та шкідливі викиди CO_2 . Це відповідає сучасним вимогам до сталого розвитку аграрної логістики.

Обговорення результатів. Отримані результати підтверджують актуальність застосування перевантажувачів зерна як технологічного елемента сучасних збирально-транспортних систем для малих агропідприємств.

Виконані розрахунки демонструють, що головним фактором підвищення ефективності є усунення простоїв комбайнів, які в традиційній схемі досягають 20–25% від загального часу зміни. При використанні перевантажувача цей показник зменшується до 6–8%.

Узгодження роботи транспортних ланок забезпечує не лише підвищення продуктивності, а й стабільність ритму збирання, що критично важливо в умовах коротких агротехнічних термінів.

Розрахунки показують, що при площі збирання 300–400 га економія часу на завершення кампанії становить до 1,5–2 днів, що дозволяє уникнути втрат урожаю через перезрівання.

У контексті транспортних технологій перевантажувач виконує роль мобільного логістичного вузла, що оптимізує взаємодію між польовою та транспортною системами. Його застосування створює передумови для цифровізації процесу (через GPS-моніторинг, телематику, автоматизоване керування маршрутами).

У малих господарствах економічна доцільність використання перевантажувача підтверджується зменшенням питомих витрат пального та збільшенням обсягу перевезеного зерна на 1 машину за зміну.

За розрахунками, окупність інвестицій у придбання перевантажувача на рівні 18–22 м³ становить близько 2 сезонів роботи.

Висновки

Встановлено, що одним із найефективніших способів підвищення продуктивності збирально-транспортного процесу у малих агропідприємствах є впровадження схеми з проміжною ланкою – перевантажувачем зерна.

Оптимізація роботи комплексу «комбайн – перевантажувач – транспорт» дозволяє зменшити простій техніки на 60–70% і підвищити коефіцієнт використання машинного часу до 0,9–0,92.

Запропонована модель узгодження часу роботи комбайна і транспорту забезпечує безперервність процесу збирання та рівномірне навантаження всіх ланок системи.

Використання перевантажувачів сприяє зниженню питомих енерговитрат, зменшенню ущільнення ґрунту й підвищенню екологічної ефективності агровиробництва.

Список використаної літератури

1. Мельник В. П. Оптимізація транспортного забезпечення збирання зернових культур // Вісник НУБіП України. 2021. № 4. С. 42–47.
2. Бойко І. М. Транспортні технології в агропромисловому комплексі. Київ : Аграрна наука, 2019. 312 с.
3. Погорілий П. О. Агроінженерія: транспортні системи та технології. Київ : НАУ, 2022. 294 с.
4. Тарасенко О. Г. Транспортні технології в аграрному секторі. Харків : ХНТУСГ, 2020. 214 с.
5. Гаврилюк С. В. Підвищення ефективності використання збирально-транспортних комплексів у малих господарствах // Механізація та електрифікація сільського господарства. 2019. № 8. С. 17–23.
6. Нефьодов В. М. Рационалізація технології перевезень зерна / В. М. Нефьодов, Ю. А. Ткаченко // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2013. Т. 3, № 3 (63). С. 13–15. URL: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/14673/12435> (дата звернення: 25.10.2025).
7. Євтушенко С. О. Логістика сільськогосподарського виробництва. Київ : КНЕУ, 2021. 348 с.
8. Шкура А. М. Аналіз ефективності застосування перевантажувачів зерна в умовах України // Техніка АПК. 2020. № 12. С. 11–15.
9. Дрозд І. С. Технологічне обслуговування зернозбиральних комбайнів. К. : НАУ, 2022. 168 с.
10. Ігнатенко І. І. Підвищення ефективності використання транспортних засобів при збиранні зернових культур / І. І. Ігнатенко, П. М. Стадник // Вісник аграрної науки. 2020. № 9. С. 72–79.
11. Василенко В. О. Організація збирально-транспортних процесів у сільському господарстві / В. О. Василенко, О. П. Гнатенко. Харків : ХНАУ, 2020. 286 с.
12. Sikora J. Support of Internal Transport Optimization in Farms with the Use of Spatial Information Systems / J. Sikora [et al.] // Agricultural Engineering. 2020. Vol. 24, Iss. 4. P. 87–94.
13. Fulton J. Efficiency of grain handling systems on small farms / J. Fulton, W. Porter, L. Smith // Agricultural Engineering International. 2020. Vol. 22, Iss. 3. P. 55–64.
14. Дослідження ефективності використання перевантажувачів зерна типу БНП-20 у фермерських господарствах : звіт кафедри транспортних технологій. Київ : НУБіП України, 2023. 47 с.

References

1. Melnyk, V. P. (2021). *Optimization of transport support for grain harvesting*. Visnyk of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, (4), 42–47. [in Ukrainian]
2. Boiko, I. M. (2019). *Transport technologies in the agro-industrial complex*. Kyiv: Agrarian Science. [in Ukrainian]
3. Pohoriliy, P. O. (2022). *Agroengineering: Transport systems and technologies*. Kyiv: National Aviation University. [in Ukrainian]
4. Tarasenko, O. H. (2020). *Transport technologies in the agricultural sector*. Kharkiv: KhNTUSG. [in Ukrainian]
5. Havryliuk, S. V. (2019). *Improving the efficiency of harvesting and transport complexes in small farms*. Mechanization and Electrification of Agriculture, (8), 17–23. [in Ukrainian]
6. Nefiodov, V. M., & Tkachenko, Yu. A. (2013). *Rationalization of grain transportation technology*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(3[63]), 13–15. Retrieved October 25, 2025, from <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/14673/12435> [in Ukrainian]
7. Yevtushenko, S. O. (2021). *Logistics of agricultural production*. Kyiv: KNEU. [in Ukrainian]
8. Shkura, A. M. (2020). *Analysis of the efficiency of grain auger wagons under Ukrainian conditions*. Tekhnika APK, (12), 11–15. [in Ukrainian]
9. Drozd, I. S. (2022). *Technological maintenance of grain harvesters*. Kyiv: NAU. [in Ukrainian]
10. Ihnatenko, I. I., & Stadnyk, P. M. (2020). *Improving the efficiency of transport vehicles in grain harvesting*. Visnyk of Agrarian Science, (9), 72–79. [in Ukrainian]
11. Vasylenko, V. O., & Hnatenko, O. P. (2020). *Organization of harvesting and transport processes in agriculture*. Kharkiv: KhNAU. [in Ukrainian]

12. Sikora, J., Kowalski, P., & Nowak, A. (2020). *Support of internal transport optimization in farms with the use of spatial information systems*. *Agricultural Engineering*, 24(4), 87–94.
13. Fulton, J., Porter, W., & Smith, L. (2020). *Efficiency of grain handling systems on small farms*. *Agricultural Engineering International*, 22(3), 55–64.
14. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. (2023). *Research on the efficiency of using BNP-20 grain auger wagons on farms: Department of Transport Technologies report*. Kyiv: NUBiP of Ukraine. [in Ukrainian]

Дата першого надходження рукопису до видання: 26.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

Т. В. СЕРДЕНКО

кандидат фізико-математичних наук,
старший викладач кафедри інженерії, технологій та професійної освіти
Мукачівський державний університет
ORCID: 0000-0002-1157-6115

О. В. МАКСЮТОВА

PhD, старший викладач кафедри інженерії, технологій
та професійної освіти
Мукачівський державний університет
ORCID: 0000-0001-8400-1382

Р. В. РОСУЛ

кандидат технічних наук,
доцент кафедри інженерії, технологій та професійної освіти
Мукачівський державний університет
ORCID: 0009-0008-6855-4612

Л. А. ПРОЦ

кандидат технічних наук,
доцент кафедри технологій машинобудування
Ужгородський національний університет
ORCID: 0000-0001-8162-2108

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ У ЗАКАРПАТСЬКІЙ ОБЛАСТІ

У статті проведено комплексний і поглиблений аналіз сучасного стану та особливостей функціонування ліній електропередач у гірській частині Закарпатської області. Висвітлено специфічні виклики, що виникають під впливом складного рельєфу Українських Карпат, різких перепадів висот, інтенсивних кліматичних та метеорологічних навантажень, а також обмеженої транспортної доступності окремих населених пунктів. Детально проаналізовано структуру регіональних електричних мереж різних класів напруги, виявлено ключові проблеми, серед яких високий рівень фізичного зношення опор і проводів, часті ушкодження, спричинені ожеледдю, сильними вітрами, сніговими навалами, ерозійними та зсувними процесами. Розглянуто технічні аспекти вибору типів опор, проводів і ізоляції, здатних забезпечити стабільну роботу ЛЕП у гірських умовах, а також особливості монтажу та експлуатаційного обслуговування в важкодоступних районах. Окрему увагу приділено впровадженню сучасних систем діагностики та автоматизації, включно з елементами Smart Grid, дистанційним моніторингом стану проводів, опор і навантажень. Проаналізовано вимоги нормативної документації, міжнародний досвід розбудови ЛЕП у гірських регіонах та потенціал інтеграції Закарпаття до європейської енергосистеми ENTSO-E. На основі проведеного дослідження сформульовано рекомендації щодо модернізації мереж, спрямовані на підвищення енергетичної надійності, стійкості та безпеки електропостачання в умовах складного гірського рельєфу.

Ключові слова: лінії електропередач, Закарпатська область, гірські умови, кліматичні ризики, модернізація, ENTSO-E, енергоефективність, Smart Grid.

T. V. SERDENKO

Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Senior Lecturer at the Department of Engineering, Technology
and Vocational Education
Mukachevo State University
ORCID: 0000-0002-1157-6115

O. V. MAKSYUTOVA

PhD, Senior Lecturer at the Department of Engineering, Technology
and Vocational Education
Mukachevo State University
ORCID: 0000-0001-8400-1382

R. V. ROSUL

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Engineering, Technology
and Vocational Education
Mukachevo State University
ORCID: 0009-0008-6855-4612

L. A. PROTS

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology
Uzhhorod National University
ORCID: 0000-0001-8162-2108

DESIGN AND OPERATIONAL ASPECTS OF POWER TRANSMISSION LINES IN THE ZAKARPATTIA REGION

The article presents a comprehensive and in-depth analysis of the current state and operational features of overhead transmission lines in the mountainous part of the Zakarpattia region. The study highlights the specific challenges arising from the complex terrain of the Ukrainian Carpathians, significant elevation differences, intense climatic and meteorological impacts, and limited transport accessibility of remote settlements. The structure of regional electrical networks of various voltage levels is examined in detail, and key technical problems are identified, including the high degree of physical wear of supports and conductors, frequent damage caused by icing, strong winds, heavy snow loads, as well as erosion and landslide processes. Technical aspects of selecting appropriate types of poles, conductors, and insulators capable of ensuring stable operation of transmission lines in mountainous conditions are discussed, along with practical issues related to installation and maintenance in hard-to-reach areas. Particular attention is given to the implementation of modern diagnostic and automation systems, including Smart Grid elements, remote monitoring of conductor and pole conditions, and load control technologies. The analysis also covers regulatory requirements, international experience in designing transmission lines in mountainous regions, and the prospects of integrating Zakarpattia into the ENTSO-E European power system. Based on the conducted research, recommendations are formulated to support the modernization of electrical networks aimed at improving the reliability, resilience, and safety of electricity supply under the challenging conditions of mountainous terrain.

Key words: transmission lines; Zakarpattia region; mountainous conditions; climatic risks; modernization; ENTSO-E; energy efficiency; Smart Grid.

Постановка проблеми

Надійне електропостачання є одним із ключових чинників соціально-економічного розвитку гірських територій. Значна частина Закарпатської області розташована в межах Українських Карпат і характеризується мозаїчним рельєфом, значними перепадами висот та підвищеною схильністю до небезпечних погодних явищ [3]. Поєднання складної орографії, високої вологості, інтенсивного снігового покриву та різких добових температурних коливань істотно ускладнює експлуатацію електричних мереж, особливо у високогірних районах Рахівського, Міжгірського та Тячівського районів. Водночас значна частина ЛЕП області була побудована ще у 1970–1980-х роках [5], що призвело до високого рівня їх фізичного зносу. Це супроводжується збільшенням технічних втрат електроенергії, падінням надійності електропостачання та необхідністю системної модернізації мереж.

Ситуацію ускладнює також розвиток туристичної інфраструктури, підвищення сезонних навантажень, будівництво нових приватних об'єктів та розширення мережі закладів рекреації. Поширення децентралізованих джерел генерації, таких як сонячні та малі гідроелектростанції [4], створює нові можливості для енергетичної автономії громад, але водночас потребує адаптації мереж до двосторонніх потоків потужності, що особливо складно в умовах гірського рельєфу. Інтеграція України до європейської енергосистеми ENTSO-E [10] актуалізує питання технічного переоснащення мереж відповідно до європейських стандартів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика функціонування та модернізації ліній електропередач у гірських регіонах посідає важливе місце у сучасних енергетичних дослідженнях, оскільки поєднує інженерні, природничі та економічні аспекти. Низка наукових праць присвячена питанням дистанційного моніторингу, підвищення надійності конструкцій, вибору оптимальних технічних рішень та управління ризиками, характерними для гірських місцевостей.

Одним із важливих напрямів світових досліджень є розроблення технологій моніторингу стану ЛЕП у реальному часі. У роботі Zeng H. та співавт. [1] висвітлюється використання LPWAN-технологій для контролю параметрів проводів і опор у важкодоступних гірських районах, що суттєво підвищує оперативність реагування на аварії та дозволяє зменшити витрати на огляд ліній. Подібні системи набувають особливої актуальності в умовах Карпат, де традиційні інспекційні методи обмежені через складний рельєф і погодні умови.

Інший блок досліджень стосується підвищення стійкості повітряних ліній до грозових явищ, які є частими у Закарпатті. У роботі Trotsenko Y. та ін. [2] аналізуються ефективність і межі застосування різних засобів блискавкозахисту, що дозволяє оптимізувати конструкції ЛЕП залежно від частоти грозової активності, діелектричних характеристик ізоляції та топографії місцевості.

У контексті розвитку регіону важливими є дослідження соціально-економічних та географічних чинників. Химинець В. В. у своїй роботі [3] акцентує увагу на тому, що сталий розвиток Карпатського регіону пов'язаний із модернізацією інфраструктури, включаючи енергетичні мережі. Автор підкреслює, що гірські території перебувають у зоні підвищеного екологічного ризику та мають значні інфраструктурні обмеження, що потребує системного підходу до енергетичної політики.

Вагомими є дослідження, присвячені розвитку відновлюваної енергетики. Поп С. С. та Шароді І. С. у праці [4] аналізують потенціал сонячної, вітрової та гідроенергетики Закарпаття, доводять економічну та екологічну доцільність інтеграції ВДЕ у локальні мережі, що може істотно підвищити енергетичну незалежність гірських громад. Наявність локальних джерел генерації також зменшує навантаження на традиційні ЛЕП, зменшуючи кількість аварійних ситуацій на віддалених ділянках.

Національні джерела, зокрема звіти АТ «Закарпаттяобленерго» [5], містять важливу інформацію щодо технічного стану мереж, ступеня їх зношеності та основних напрямів інвестицій у регіон. Дані компанії свідчать, що понад 40 % ліній 0,4–10 кВ перебувають у незадовільному стані, що збігається з результатами незалежних досліджень IEA [9].

Міжнародний досвід проєктування та експлуатації ЛЕП у гірських місцевостях також представлений низкою фундаментальних робіт. Зокрема, Malar Kodi P. [6] описує застосування LiDAR-технологій для оптимізації трасування електроліній, що дозволяє прогнозувати ризики ерозії, лавинних зрушень і зсувів. Праця BC Hydro [8] аналізує конструктивні рішення, здатні витримувати лавинні навантаження, і демонструє практичні підходи до вибору типів опор, які можуть бути ефективними і для Карпатського регіону.

Міжнародне енергетичне агентство у звіті «Electricity security in mountainous regions» [9] наголошує на тому, що гірські системи електропередач мають підвищені вимоги щодо матеріалів, систем автоматизації та резервування. Це актуально для Закарпаття, оскільки навіть короточасні обриви можуть призвести до значних збитків у умовах віддалених населених пунктів.

У документах ENTSO-E, зокрема у TYNDP 2022 [10], визначено стратегічні напрями розвитку європейської енергетичної інфраструктури, включно з інтеграцією периферійних і гірських регіонів. Згідно з цією програмою, модернізація ЛЕП має ґрунтуватися на стандартизованих підходах, високих вимогах до кліматичної стійкості та широкому застосуванні інтелектуальних мереж.

Підсумовуючи проведений аналіз літератури, можна сказати, що сучасні дослідження надають цінні рекомендації щодо підвищення стійкості ЛЕП у складних природних умовах, хоча комплексних робіт, присвячених саме Закарпатській області, обмежена кількість. Це підкреслює актуальність проведення подібних регіональних досліджень і обґрунтовує необхідність системного наукового підходу до модернізації електромереж Карпатського регіону.

Викладення основного матеріалу дослідження

Закарпаття поєднує низинні райони на південному заході області та різко виражений гірський рельєф на більшій частині території. Перепади висот, вузькі ущелини, стрімкі схили, нестабільні ґрунти та високий рівень зволоження створюють значні труднощі при виборі трас для ліній електропередач (ЛЕП). Часто маршрути проходять у зонах річкових долин, де існує підвищений ризик підтоплення територій і підмивання основ опор. Додатковими проблемами є інтенсивні ерозійні процеси, зсуви та обвали порід, що ускладнює довготривалу надійність споруд і потребує ретельного геологічного моніторингу. Вибір оптимальної траси ЛЕП у гірських районах найчастіше зводиться до компромісу між технічною доцільністю, економічною ефективністю та екологічними обмеженнями, притаманними Карпатському регіону.

Монтажні роботи у важкодоступній місцевості потребують застосування спеціалізованої техніки, тривалих підготовчих робіт, а іноді – використання вертольотів, гусеничної техніки або піших бригад. Це суттєво збільшує вартість реалізації проєктів та ускладнює оперативне реагування на аварії. У зимовий період, коли гірські перевали частково або повністю перекриті, виконання відновлювальних робіт може тривати в декілька разів довше, ніж у рівнинних районах.

Кліматичні особливості Закарпаття впливають на експлуатацію мереж не менш суттєво, ніж рельєф. Тривалі періоди ожеледі формують небезпечні крижані нашарування на проводах, які можуть збільшувати їхню масу

в 3–5 разів залежно від діаметра проводу та тривалості обмерзання [9]. Крижаний наліт та мокрий сніг створюють значне крутильне навантаження, що призводить до обривів або перегинання проводів, деформації траверс, тріщин в ізоляторах. У високогір'ї поширені фєнові вітри та пориви великої швидкості, які викликають горизонтальні навантаження, небезпечні для будь-яких типів опор. Великі маси вологого снігу є головною причиною руйнування ліній 0,4–10 кВ, які вже мають високий ступінь фізичного зносу [5]. У літній період посилюється ризик грозових перенапруг, що вимагає підвищеної уваги до систем блискавкозахисту [2].

Структура електричних мереж Закарпатської області характеризується значною розгалуженістю та неоднорідністю. Лінії 220 кВ забезпечують транскордонні енергетичні потоки та відіграють ключову роль у взаємодії з європейською системою ENTSO-E [10]. ЛЕП 110 кВ виконують функцію міжрайонного передавання електроенергії та обслуговують основні інфраструктурні вузли. Розподільчі мережі 35 та 10 кВ є основою живлення більшості гірських населених пунктів, а кінцеві споживачі користуються переважно мережами 0,4 кВ. Значна частина останніх експлуатується понад нормативний термін та має високий рівень технічних втрат – у середньому 12–14 % [5], що вдвічі перевищує середні показники країн ЄС.

Проектування ЛЕП у гірських районах потребує спеціальних технічних рішень. Металеві ґратчасті та трубчасті опори мають збільшену стійкість до вітрових та ожеледних навантажень і характеризуються кращими антикорозійними властивостями порівняно з традиційними залізобетонними конструкціями [8]. У місцевостях зі складною геологічною структурою застосовують фундаментні рішення зі збільшеною площею опори, пальові конструкції та анкерні системи. Врахування вимог ДСТУ EN 50341-1:2018 забезпечує стандартизований підхід до визначення кліренсів, вибору типів ізоляторів та конструктивних параметрів опор.

Вибір проводів та ізоляції відіграє критичну роль у забезпеченні надійності ЛЕП. Сталево-алюмінієві проводи (АС, АСО) мають високу механічну міцність та добре зарекомендували себе в умовах ожеледи. У населених пунктах, де траса ЛЕП проходить поблизу дерев, доцільно застосовувати самонесучі ізольовані проводи (СПП), які знижують ризик коротких замикань і мають нижчу ймовірність механічних ушкоджень [5]. Полімерні ізолятори демонструють підвищену стійкість до морозів, вологи та забруднень, що робить їх переважним варіантом для гірських регіонів [9]. У зонах із підвищеною лавинною активністю, таких як Рахівський район, необхідне встановлення захисних екранів і використання спеціалізованих опор із підвищеною жорсткістю [8].

Монтаж та обслуговування ЛЕП у горах є трудомісткими та затратними процесами. Використання дронів-інспекторів дозволяє оперативно оцінювати стан опор та проводів, особливо у важкодоступних місцях. Дистанційні сенсори моніторингу провисання, системи раннього виявлення ожеледі та LPWAN-технології [1] значно скорочують час реагування на аварії. Такі технології є ключовим елементом переходу до інтелектуальних мереж Smart Grid, які передбачають впровадження автоматизованих реклоузерів, інтелектуальних лічильників та системи SCADA для оперативного керування потоками електроенергії [10].

Важливим напрямом розвитку є інтеграція відновлюваних джерел енергії у локальні мережі. Малі гідроелектростанції (до 1 МВт), поширені у верхів'ях карпатських річок, забезпечують стабільне базове навантаження [7]. Сонячні та вітрові мікроустановки, формуючи локальні мікромережі, зменшують навантаження на магістральні ЛЕП і підвищують енергетичну автономію громад [4]. У перспективі такі рішення можуть значно знизити потребу у довгих повітряних лініях у важкодоступних місцях.

Висновки

Експлуатація ліній електропередач у гірських умовах Закарпатської області супроводжується численними інженерними, природними та організаційними викликами, що суттєво ускладнюють забезпечення надійного та безперебійного електропостачання. Поеднання складного гірського рельєфу, інтенсивних кліматичних навантажень, нестабільних ґрунтів та високої частки зношених мереж створює комплекс ризиків, які потребують системного підходу до управління. Наявні повітряні лінії, переважно збудовані в попередні десятиліття, не відповідають сучасним вимогам навантажувальної здатності та кліматичної стійкості, що призводить до частих пошкоджень, значних технічних втрат та тривалих перерв в електропостачанні, особливо у зимово-весняний період.

Підвищення надійності можливе лише за умови переходу до комплексної модернізації мереж. Застосування сучасних конструкцій опор, сталево-алюмінієвих та ізольованих проводів, полімерних ізоляторів і укріплених фундаментних систем дозволяє суттєво підвищити механічну стійкість ЛЕП у складних природних умовах. Впровадження автоматизованих систем контролю та управління, включно з технологіями Smart Grid, реклоузерами, системами дистанційного моніторингу, є ключовим кроком до оперативного реагування на аварійні ситуації та мінімізації простоїв.

Важливим стратегічним напрямом є інтеграція відновлюваних джерел енергії – малих ГЕС, сонячних та вітрових установок – у локальні мережі, що може знизити залежність гірських громад від довгих повітряних ліній та зробити енергопостачання більш стійким і автономним. Використання міжнародного досвіду з країн, що мають подібні природні умови, сприяє розробці надійних інженерних рішень, адаптованих до лавинних зон, крутих схилів та складних геологічних ділянок.

Інтеграція Закарпаття до ENTSO-E відкриває можливості для залучення інвестицій та технічної допомоги, що дозволить прискорити модернізацію регіональних мереж, забезпечити впровадження сучасних матеріалів та технологій, а також підвищити стійкість електроенергетичної інфраструктури до змін клімату. Врахування нормативних вимог ЄС та імплементація найкращих світових практик є необхідною передумовою підвищення рівня безпеки та надійності електропостачання.

Отже, комплексна модернізація електромереж Закарпаття повинна поєднувати технічні інновації, автоматизацію, розвиток місцевих джерел генерації та глибокий урахування природно-кліматичних особливостей регіону. Лише системний підхід забезпечить довгострокову стійкість, енергонезалежність і високий рівень електробезпеки гірських громад.

Список використаної літератури

1. Zeng, H., Zuo, P., Deng, F., Zhang, P. Monitoring System of Transmission Line in Mountainous Area Based on LPWAN [Електронний ресурс] // *Energies*. – 2020. – Vol. 13, No. 18. – Article 4898.
2. Trotsenko Y., Yandulskyy O., Dixit M., Peretyatko J. Effect of discharge current magnitude on effectiveness of overhead power line protection against direct lightning strokes // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. – 2023. – № 2 (72). – С. 26–32.
3. Химинець В. В. Сталій розвиток Карпатського регіону в контексті євроінтеграційної політики України / В. В. Химинець // *Екологія і природокористування*. – 2013. – Вип. 16. – С. 71–80.
4. Поп, С. С., Шароді, І. С. (2022). Освоєння відновлюваних енергетичних ресурсів Закарпатської області в контексті збалансованого розвитку // *Український географічний журнал*, 2022, № 3 (119), с. 36–44.
5. АТ «Закарпаттяобленерго». Звіт про виконання інвестиційної програми та план розвитку електричних мереж 2023–2024 рр.
6. Malar Kodi P. Optimisation of transmission line design in mountain regions using advanced cartographic techniques and LiDAR // *Proceedings of the 17th Mountain Cartography Workshop*. – 2015.
7. Хмара А. Т., Симоненко П. Л. До питання створення та експлуатації річкових берегових гідроелектростанцій без будівництва гребель і накопичувальних водосховищ // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. – 2023. – № 1 (138). – С. 7–12.
8. Designing overhead transmission lines to withstand snow avalanches (BC Hydro case study) // *Geo-Congress 2018*.
9. International Energy Agency. Electricity security in mountainous regions: challenges and opportunities. – Paris: IEA, 2021.
10. ENTSO-E. Ten-Year Network Development Plan (TYNDP) 2022. – Brussels: European Network of Transmission System Operators for Electricity, 2022.

References

1. Zeng, H., Zuo, P., Deng, F., & Zhang, P. (2020). Monitoring system of transmission line in mountainous area based on LPWAN [Електронний ресурс] [Monitoring system of transmission line in mountainous area based on LPWAN]. *Energies*, 13(18), Article 4898.
2. Trotsenko, Y., Yandulskyy, O., Dixit, M., & Peretyatko, J. (2023). Effect of discharge current magnitude on effectiveness of overhead power line protection against direct lightning strokes [Effect of discharge current magnitude on effectiveness of overhead power line protection against direct lightning strokes]. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia* [Energy: Economics, Technologies, Ecology], 2(72), 26–32. [in Ukrainian].
3. Khymynets, V.V. (2013). Stalyi rozvytok Karpatskoho rehionu v konteksti yevrointehratsiinoi polityky Ukrainy [Sustainable development of the Carpathian region in the context of Ukraine's European integration policy]. *Ekologiya i pryrodokorystuvannia* [Ecology and Nature Management], 16, 71–80. [in Ukrainian].
4. Pop, S.S., & Sharodi, I.S. (2022). Osvoeyennia vidnovliuvanykh enerhetychnykh resursiv Zakarpatskoi oblasti v konteksti zbalansovanoho rozvytku [Development of renewable energy resources of the Zakarpattia region in the context of balanced development]. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal* [Ukrainian Geographical Journal], 3(119), 36–44. [in Ukrainian].
5. АТ “Zakarpattiaoblenerho”. (2023). Zvit pro vykonannia investytsiinoi prohramy ta plan rozvytku elektrychnykh merezh 2023–2024 rr. [Report on the implementation of the investment program and development plan of electrical networks 2023–2024]. [in Ukrainian].
6. Malar Kodi, P. (2015). Optimisation of transmission line design in mountain regions using advanced cartographic techniques and LiDAR. In *Proceedings of the 17th Mountain Cartography Workshop*.
7. Khmara, A.T., & Symonenko, P.L. (2023). Do pytannia stvorennia ta ekspluatatsii richkovykh berehovykh hidroelektrostantsii bez budivnytstva hrebel i nakopychuvalnykh vodoshkovichykh [On the creation and operation of riverbank hydroelectric power plants without dam and reservoir construction]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho*

universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho [Herald of Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University], 1(138), 7–12. [in Ukrainian].

8. Designing overhead transmission lines to withstand snow avalanches (BC Hydro case study). (2018). In *Geo-Congress 2018*.

9. International Energy Agency. (2021). *Electricity security in mountainous regions: challenges and opportunities*. Paris: IEA. <https://www.iea.org/reports/electricity-security-in-mountainous-regions> [in English].

10. ENTSO-E. (2022). *Ten-Year Network Development Plan (TYNDP) 2022*. Brussels: European Network of Transmission System Operators for Electricity.

Дата першого надходження рукопису до видання: 12.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 09.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

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 ВОДИ ВНАСЛІДОК ВІЙСЬКОВО-АНТРОПОГЕННИХ ВПЛИВІВ

У даній роботі розглянуто досвід Європейського Союзу стосовно досліджень водних ресурсів на територіях минулих військових конфліктів, а також виконано порівняльні дослідження зразків води з територій України, що короткий час перебували під окупацією. Значну кількість досліджень в Європі було проведено у ХХІ столітті та з'ясовано, що наслідки Першої та Другої світових війн все ще впливають на здоров'я населення та якість води в постраждалих районах. Використання шкідливих хімічних речовин на військових базах, у тому числі на острові Уналашка (Алеутські острови, США), вказує на цю проблему, оскільки минулі військові операції постійно забруднювали прилеглі запаси води. У той час як кількісний аналіз показав низькі ризики впливу з боку питної води, проста наявність забруднюючих речовин, таких як миш'як, свинець, алюміній, чи нафтопродукти, дотепер створює приховану загрозу місцевим екосистемам і здоров'ю людини. 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 води в декількох місцевостях Київської області та проведено їх дослідження в лабораторних умовах. Відмічено незначне підвищення вмісту алюмінію та нафтопродуктів у деяких пробах порівняно із пробамі, відібраними у Львівській області. Зважаючи на умови відбору проб у місцевостях, що перебували під короткочасною окупацією та 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 у поверхневих та ґрунтових вод на звільнених територіях є необхідною процедурою для подальшого їх використання.

Ключові слова: забруднення поверхневих та ґрунтових вод, небезпечні хімічні елементи, антропогенний вплив, військові дії, європейський досвід.

М. І. 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 WATER POLLUTION DUE TO MILITARY-ANTHROPOGENIC INFLUENCES

This work examines the experience of the European Union regarding research of water resources in the territories of past military conflicts, as well as comparative studies of water samples from the Ukrainian territories that were under occupation for a short time. A significant amount of research in Europe was conducted in the 21st century and found that the consequences of the First and Second World Wars still affect public health and water quality in the affected areas. The use of harmful chemicals at military bases, including on Unalaska Island (Aleutian Islands, United States), points to this problem, as past military operations have continuously contaminated nearby water supplies. While quantitative analysis has shown low risks of exposure to drinking water, the mere presence of pollutants such as arsenic, lead, aluminum, or petroleum products still poses a hidden threat to local ecosystems and human health. 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. Water sampling was carried out in some areas of the Kyiv region and their research was carried out in laboratory conditions. A slight increase in the content of aluminum and petroleum products in some samples compared to samples taken in the Lviv region was noted. Taking into account the conditions of sampling in areas that were under short-term occupation and came under artillery fire, namely, at the risk of mines and unexploded ordnance, a more detailed analysis is not possible, but after the deactivation of explosive residues, a detailed study of the composition of chemical elements in surface and groundwater in the liberated territories is a necessary procedure for their further use.

Key words: pollution of surface and groundwater; dangerous chemical elements, anthropogenic influence, military actions, European experience.

Постановка проблеми

Однією з головних цілей ВООЗ та її держав-членів є те, що “усі люди, якою б не була їхня стадія розвитку та соціально-економічні умови, мають право на доступ до належного постачання безпечної питної води” [13, с. 3]. Основна функція ВООЗ у досягненні таких цілей – це відповідальність щодо пропонування законодавчих актів та створення рекомендацій щодо міжнародних питань охорони здоров'я.

Вода виконує дві основні функції, а саме є необхідною умовою для життя на Землі, а також є економічним ресурсом для подальшого розвитку. В усьому світі ці дві ролі часто перебувають у протистоянні головним чином через постійний конфлікт між різними цілями використання води як засобами до існування людей та навколишнім середовищем. Цей процес, як наслідок, призвів до збільшення ризиків у збройних конфліктах і створив значний тиск саме на водні екосистеми та життя, яке вони підтримують.

Взаємозв'язок війни та погіршення навколишнього середовища стає особливо критичним при дослідженні наслідків конфліктів. Війна не тільки руйнує фізичну інфраструктуру, але й прискорює низку криз у сфері охорони навколишнього середовища та здоров'я. Внесення забруднюючих речовин (хімічних та вибухових) через військові дії руйнує водні об'єкти, що довели дослідження історії починаючи з Першої світової війни. Оскільки Україна вже четвертий рік знаходиться в стані війни, внаслідок обстрілів та тимчасової окупації стає можливим пошкодження основних водних ресурсів та їхня небезпека для споживання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Протягом історії, особливо під час збройних конфліктів, військові дії та шкода навколишньому середовищу були нерозривно пов'язані. Стратегічне націлювання на пошкодження водопостачання, наприклад, стало тактикою, яку історично застосовують у війнах, і яка завдає великої екологічної шкоди та ставить під загрозу здоров'я населення. Зростаючі показники пошкодження навколишнього середовища підкреслюють його незахищеність та вказують на те, що такі дії посилюють його вже існуючу вразливість. Вплив війни на водні системи ставить під загрозу безпосереднє оточення та цивільне населення в довгостроковій перспективі та збільшує ймовірність конфлікту через зменшення ресурсів чистих поверхневих та ґрунтових вод. Над дослідженням проблеми в історичному та сучасному аспектах працювали, зокрема, такі організації, як Всесвітня організація охорони здоров'я, світові науковці І. Аладган, Н. Альмгавіш, Р. Г. Аласфар, А. дю Плессі, К.Т. Котсіс, Р. Ладо, Г. Мереса, С.С. Саї, Р. Табор, Р.А. Френсіс тощо, та українські науковці С. Величко, Н. Дудяк, О. Дупляк, Д. Онопрієнко, Л. Потравка, С. Степаненко, О. Шевченко та інші досліджували важливість дослідження впливу забруднень ґрунтових та поверхневих вод внаслідок військових дій. Однак, європейські країни мають значний досвід у дослідженнях забруднень води та їхніх впливів на здоров'я громадян, отже варто його розглянути та дослідити як зразки води із звільнених територій, так і можливості застосування таких досліджень після звільнення територій України від окупації.

Формулювання мети дослідження

Проаналізувати досвід Європейського Союзу стосовно досліджень впливу забруднень води внаслідок військових дій та здійснити аналіз води в регіонах України, звільнених від окупації.

Викладення основного матеріалу дослідження

Конкуренція за використання води між сільськогосподарським, промисловим і побутовим секторами може призвести до конфліктів, особливо під час збільшення нестачі води, спричиненої забрудненням і надмірним використанням [2]. Історично вода була джерелом напруги, конфлікти виникали не лише через територіальні суперечки та стратегічні переваги, але й через дефіцит води [5]. Це відображають сучасні події, такі як сирійський конфлікт, де контроль доступу до води був одним із вирішальних факторів [8]. Крім того, навмисне забруднення водопостачання стало тактикою війни та тероризму, що створює серйозні ризики для здоров'я населення та економічні наслідки. Динаміка конфліктів забруднення вгору та вниз за течією ще більше показує, як рішення та переваги зацікавлених сторін можуть вплинути на вирішення цих конфліктів [14]. Тому в багатьох різних контекстах забруднення води тісно пов'язане з початком і поширенням конфліктів.

Здебільшого через застосування хімічної зброї та інших військових операцій Перша Світова війна сильно вплинула на забруднення води та здоров'я навколишнього середовища. Коли хімічні речовини, включаючи газоподібний хлор, вийшли на сцену, це призвело до довгострокових екологічних наслідків. Дослідження в таких областях, як Па-де-Кале у Франції, також показали, що артилерійські обстріли забруднили ґрунт важкими металами, особливо свинцем і міддю, що поставило під загрозу якість води та здоров'я людей [15]. Хоча результати досліджень показали низький рівень забруднення важкими металами ґрунтів на півострові Галліполі (Туреччина) (19 лютого 1915 року англо-французький флот за підтримки авіації почав обстріл берегових укріплень в районі міста Кумкале при вході до Дарданел, який попри інтенсивність не приніс бажаного результату, як і друга спроба 25 лютого, однак до кінця місяця флоту Антанти все ж вдалось придушити турецькі берегові батареї), історичне використання вибухових речовин викликає питання щодо можливості вимивання шкідливих речовин у воду. Крім того, правові системи, що контролюють охорону води під час збройних конфліктів, мають суттєві недоліки, що підкреслює необхідність удосконалення законів для захисту цього важливого ресурсу під час війни [15, с. 559].

Багато різних процесів призводять до забруднення джерел води під час збройних конфліктів, що загострює вже існуючі гуманітарні проблеми. Пряме забруднення внаслідок фізичного руйнування інфраструктури, включаючи трубопроводи та водоочисні споруди, спричиняє викиди небезпечних речовин та відходів. Крім того, у військових операціях використовуються смертоносні агенти та зброя, які можуть забруднювати системи поверхневих і підземних вод. Окрім підвищення ймовірності захворювань, що передаються через забруднену воду, погіршення якості води підвищує фізичну та психологічну вразливість постраждалого населення. Крім того, включення сучасних технологій і систем у підтримку стійкості до таких забруднень може бути досить важливим для зменшення цих небезпек у постконфліктних ситуаціях.

Отже, пряме руйнування водної інфраструктури, включаючи трубопроводи та очисні споруди, призводить до негайного пошкодження обладнання та хімічного забруднення. Побічне забруднення зазвичай більш серйозне, оскільки руйнування контейнерів для зберігання хімікатів і нафти спричиняє потрапляння небезпечних сполук у водойми, що тривало погіршує якість води [12]. Крім того, навмисне забруднення водопостачання вже давно використовується у війні, включаючи такі сучасні методи як кібератаки та розповсюдження біологічних агентів.

Підкреслюючи заборону нападів на водні ресурси, необхідні для виживання цивільного населення, міжнародне гуманітарне право пропонує певний захист від таких дій. Тим не менш, правозастосування все ще є складним; безперервний конфлікт в Україні показує, наскільки терміново необхідні ґрунтовні правові системи для захисту водопостачання під час війни. Отже, попри безпосередні людські жертви, збройний конфлікт має наслідки, що включають значну шкоду життєво важливі інфраструктурі, особливо водопостачанню.

Вищі концентрації забруднюючих речовин, таких як свинець, цинк, алюміній та нафтопродукти, що спостерігаються в районах, які постраждали від конфлікту, що перевищують національні порогові значення, демонструють довготривалі екологічні наслідки цього зниження якості води. Занепокоєння щодо токсичності алюмінію (Al) здається не безпідставним. Деякі випадки пов'язані з тим фактом, що алюміній є нейротоксичною речовиною, яка була виявлена у високих рівнях у тканинах мозку пацієнтів з хворобою Альцгеймера, епілепсією та аутизмом. Інші випадки пов'язані з немовлятами, особливо недоношеними та з нирковою недостатністю, які мають ризик хибного розвитку центральної нервової системи і токсичності кісток [1, 3]. Розливи та витоки нафтопродуктів теж достатньо поширені з огляду на їхнє зберігання, транспортування і використання збройними силами. Вплив компонентів нафтопродуктів через питну воду може бути коротко- або довгостроковим. Загалом, алкани як компоненти нафтопродуктів мають відносно низьку токсичність, але алкани з кількістю атомів вуглецю в діапазоні 5–12 мають наркотичні властивості, особливо після інгаляційного впливу високих концентрацій. Повторний вплив високих концентрацій n-гексану може призвести до незворотного впливу на нервову систему. Алкени виявляють незначну токсичність, крім слабких анестетичних властивостей. Більшість коротших ароматичних сполук мають відносно низьку токсичність, за винятком бензолу, який є відомим канцерогеном для людини [13, с. 11].

Безперервні військові операції здебільшого надають головний пріоритет стратегічним цілям над екологічними проблемами, таким чином ігноруючи екологічні наслідки та ще більше підкреслюючи критичну потребу інтегрованої екологічної політики в зонах конфлікту. Забруднення води в районах, спустошених війною, має значні соціальні наслідки, які впливають на здоров'я населення, фінансову стабільність і соціальну згуртованість. З економічними збитками, що сягають десятків мільярдів доларів, і можливою витратою 600 мільярдів доларів у зусиллях з відновлення економіки, руйнування прісноводної інфраструктури призводить до критичних втрат питної води в Україні [6, 7].

Недавні дослідження з багатьох зон конфлікту чітко показують основні та складні наслідки прямого руйнування водної інфраструктури під час збройних конфліктів. Військові операції в Україні були спрямовані на важливі системи водопостачання, включаючи Каховську дамбу, що серйозно вплинуло на цивільне водопостачання, життєздатність сільського господарства та здоров'я екосистеми. Подібним чином у Тиграї, Ефіопія, руйнування водної інфраструктури під час безперервного конфлікту вдвічі зменшило доступ до безпечної питної води, що наражає мільйони людей на небезпеку для здоров'я та погіршує продовольчу кризу [9]. Цілеспрямовані удари по водній інфраструктурі на північному сході Сирії призвели до підвищення рівня захворювань, що передаються через воду, тому підкреслюють довгострокові наслідки таких порушень для здоров'я населення [11]. Ці суперечки підкреслюють тривожну тенденцію, коли водні ресурси стають зброєю, яка негайно та назавжди завдає шкоди навколишньому середовищу, а також цивільному населенню [12].

Безперервна війна в Україні завдає великої та різноманітної довгострокової екологічної шкоди водним екосистемам. Знищення важливих сховищ прісної води серйозно вплинуло на постачання питної та зрошувальної води, що призвело до великих екологічних та фінансових втрат, прогнозованих у десятки мільярдів доларів [7, с. 124]. Після руйнування дамб і водосховищ, що змінило гідрологічні режими та призвело до втрати середовища існування флори та фауни, війна підвищила рівень забруднення з більшою концентрацією азоту, нафтопродуктів та

важких металів у водоймах. Розробка політики, яка зменшує негативні наслідки війни для важливих джерел води, залежить від усвідомлення цієї історичної динаміки.

Відбір зразків води у Бучанському районі Київської області, що недовгий час перебував під окупацією, та у Львівській області було здійснено у 2025 році. Було проведено аналіз відібраних зразків, результати якого наведено в Таблицях 1-2.

Таблиця 1

Місце та дата відбору (прив'язка до місцевості)	Назва	Результат вимірюван-ня	Нормоване значення ГДК
Львівська обл, Стрийський р-н, розвід. Сверд. № 703 «Більче-Волицьке» На схід від с. П'ятничани; 50м на пнхс від бурової ставок 49°23'55.1"N 23°56'40.1"E 22.05.2025 13:24	Температура, С°	13,8	-
	Запах, бали	1	-
	pH, од. pH	8,18	6,5-8,5
	ХСК, мг/дм³	20,4	50,0
	БСК ₅ , мг/дм³	2,2	3,0
	Азот амонійний, мг/дм³	0,55	0,5-1,0
	Хлориди, мг/дм³	23,2	300,0
	Нітрати, мг/дм³	2,48	45,0
	Нітроти, мг/дм³	0,093	3,3
	Завислі речовини, мг/дм³	12,3	25,0
	Сухий залишок (мінералізація), мг/дм³	186,5	1000,0
	Сульфати, мг/дм³	34,6	500,0
	СПАР, мг/дм³	0,013	0,5
	Фосфати, мг/дм³	0,08	3,5
	Залізо загальне, мг/дм³	0,28	0,3
	Нафтопродукти, мг/дм³	<0,01	0,3
	Окислюваність, мгО/дм³	0,9	-
	Розчинений кисень, мг/дм³	4,3	-
	Алюміній, мг/дм³	<0,0034	0,5
	Кальцій, мг/дм³	17,8	200,0
	Магній, мг/дм³	12,5	50

Таблиця 2

Місце та дата відбору (прив'язка до місцевості)	Назва	Результат вимірюван-ня	Нормоване значення ГДК
Київська обл., Бучанський р-н, с. Козинці, вул. Шкільна, 25; забір води зі струмка 16.04.2025 14:45	Температура, С°	14,2	-
	Запах, бали	1	-
	pH, од. pH	8,0	6,5-8,5
	ХСК*, мг/дм³	45,6	50,0
	БСК ₅ **, мг/дм³	2,8	3,0
	Азот амонійний, мг/дм³	0,52	0,5-1,0
	Хлориди, мг/дм³	22,0	300,0
	Нітрати, мг/дм³	2,6	45,0
	Нітроти, мг/дм³	0,093	3,3
	Завислі речовини, мг/дм³	25,7	25,0
	Сухий залишок (мінералізація), мг/дм³	186,2	1000,0
	Сульфати, мг/дм³	33,0	500,0
	СПАР, мг/дм³	0,016	0,5
	Фосфати, мг/дм³	0,07	3,5
	Залізо загальне, мг/дм³	0,34	0,3
	Нафтопродукти, мг/дм³	0,28	0,3
	Окислюваність, мгО/дм³	0,6	-
	Розчинений кисень, мг/дм³	5,0	-
	Алюміній, мг/дм³	<0,003	0,5
	Кальцій, мг/дм³	16,6	200,0
	Магній, мг/дм³	13,2	50

*ХСК води – хімічне споживання кисню

**БСК₅ – біохімічне споживання кисню за 5 діб

Висновки

У результаті проведених досліджень було виявлено, що ґрунти на територіях, де велися активні бойові дії, зазнали суттєвих забруднень, зокрема нафтопродуктами, мають підвищені значення ХСК та БСК₅, що означає забруднення органічними речовинами. Ці території потребують очищення та довготривалого відновлення водних ресурсів.

На інших досліджених земельних ділянках суттєвого забруднення вод, 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. Alasfar R.H., Isaifan R.J. Aluminum environmental pollution: the silent killer. *Environmental science and pollution research international*, 28(33). 2021. P. 44587–44597. doi: 10.1007/s11356-021-14700-0
2. du Plessis A. Water as an Inescapable Risk. Springer, Cham, 2019. 290 p.
3. Dzulfakar M. A., Shaharuddin M. S., Muhaimin A. A., Syazwan A. I. Risk assessment of aluminum in drinking water between two residential areas. *Water*, 3. 2011. P. 882–893. doi: 10.3390/w3030882.
4. Erdogan O., Kara M. Analytical approach to the waste management of nanomaterials in developing countries. *Frontiers in Drug, Chemistry and Clinical Research*, 2. 2019. P. 1–5. <https://doi.org/10.15761/FDCCR.1000117>
5. Francis R. A. The impacts of modern warfare on freshwater ecosystems. *Environmental Management*, 48. 2011. P. 985–999. <https://doi.org/10.1007/s00267-011-9746-9>
6. Hameed A. A. S. Pollution of Water's direct effect in Iraq on the Public Health & Safety. *Journal of Al-Farabi for Engineering Sciences*, 2(2). 2024. P.12–14. <https://doi.org/10.59746/jfes.v2i2.78>
7. Hapich H., Novitskyi R., Onoprienko D., Dent D. Water security consequences of the Russia-Ukraine war and the post-war outlook. *Water Security*, 21. 2024. P. 100–167. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2024.100167>
8. Kotsis K. T. Water Pollution in Times of War. *European Journal of Ecology, Biology and Agriculture*, 2(4). 2025. P. 27–40. DOI: 10.59324/ejeba.2025.2(4).03
9. Shishaye H. A., Gebremicael T. G., Meresa H., Gebre F. A. Assessing the impact of war on the water supply infrastructure in Tigray, Ethiopia. Preprint, 2023. URL: <https://eartharxiv.org/repository/view/5016/>
10. Syage J. A., Cai S. S., Li J., Evans M. D. Direct Sampling of Chemical Weapons in Water by Photoionization Mass Spectrometry. *Analytical Chemistry*, 78(9). 2006. P. 2967–2976. <https://doi.org/10.1021/ac0518506>
11. Tabor R., Almhawish N., Aladhan I., Tarnas M. Disruption to water supply and waterborne communicable diseases in northeast Syria: a spatiotemporal analysis. *Conflict and health*, 17(1). 2023. P. 4. <https://doi.org/10.1186/s13031-023-00502-3>
12. Velychko S., Dupliak O. The impact of full-scale armed conflict on water bodies as water supply sources. *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulic*, (45). 2023. P.5–14. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.45.5-1>
13. WHO. Petroleum Products in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. World Health Organization, 2008. 20 p.
14. Yu J., Zhao M., Sun D., Dong J. Research on the water pollution conflict between the upstream area and the downstream area in a river basin based on GMCR. *Journal of Hydraulic Engineering*, 44(12). 2013. P.1389–1398.
15. Zemmali A. The protection of water in times of armed conflict. *International Review of the Red Cross*, 35 (308). 1995. P. 550–564. <https://doi.org/10.1017/S0020860400089610>

References

1. Alasfar, R.H. & Isaifan, R.J. (2021). Aluminum environmental pollution: the silent killer. *Environmental science and pollution research international*. 28(33):44587–44597. doi: 10.1007/s11356-021-14700-0
2. du Plessis, A. (2019). Water as a Source of Conflict and Global Risk. In: Water as an Inescapable Risk. Springer, Cham.
3. Dzulfakar, M. A., Shaharuddin, M. S., Muhaimin, A. A., Syazwan, A. I. (2011). Risk assessment of aluminum in drinking water between two residential areas. *Water*, 3:882–893. doi: 10.3390/w3030882.
4. Erdogan, O., & Kara, M. (2019). Analytical approach to the waste management of nanomaterials in developing countries. *Frontiers in Drug, Chemistry and Clinical Research*, 2, 1-5. <https://doi.org/10.15761/FDCCR.1000117>
5. Francis, R. A. (2011). The impacts of modern warfare on freshwater ecosystems. *Environmental Management*, 48, 985-999. <https://doi.org/10.1007/s00267-011-9746-9>
6. Hameed, A. A. S. (2024). Pollution of Water's direct effect in Iraq on the Public Health & Safety. *Journal of Al-Farabi for Engineering Sciences*, 2(2), 12–14. <https://doi.org/10.59746/jfes.v2i2.78>
7. Hapich, H., Novitskyi, R., Onoprienko, D. & Dent, D. (2024). Water security consequences of the Russia-Ukraine war and the post-war outlook. *Water Security*, 21, 100–167. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2024.100167>

8. Kotsis, K. T. (2025). Water Pollution in Times of War. *European Journal of Ecology, Biology and Agriculture*, 2(4), 27–40. DOI: 10.59324/ejeba.2025.2(4).03
9. Shishaye, H. A., Gebremicael, T. G., Meresa, H., & Gebre, F. A. (2023). Assessing the impact of war on the water supply infrastructure in Tigray, Ethiopia. Preprint, available at: <https://eartharxiv.org/repository/view/5016/>
10. Syage, J. A., Cai, S. S., Li, J., & Evans, M. D., (2006). Direct Sampling of Chemical Weapons in Water by Photoionization Mass Spectrometry. *Analytical Chemistry*, 78(9), 2967–2976. <https://doi.org/10.1021/ac0518506>
11. Tabor, R., Almhawish, N., Aladhan, I., & Tarnas, M. (2023). Disruption to water supply and waterborne communicable diseases in northeast Syria: a spatiotemporal analysis. *Conflict and health*, 17(1), 4. <https://doi.org/10.1186/s13031-023-00502-3>
12. Velychko, S., & Dupliak, O. (2023). The impact of full-scale armed conflict on water bodies as water supply sources. *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulic*, (45), P.5–14. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.45.5-1>
13. WHO (2008). Petroleum Products in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. World Health Organization.
14. Yu, J., Zhao, M., Sun, D., & Dong, J. (2013). Research on the water pollution conflict between the upstream area and the downstream area in a river basin based on GMCR. *Journal of Hydraulic Engineering*, 44(12), 1389–1398.
15. Zemmali, A. (1995). The protection of water in times of armed conflict. *International Review of the Red Cross*, 35 (308), 550–564. <https://doi.org/10.1017/S0020860400089610>

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 14.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

О. В. СТЕПАНОВ

доктор технічних наук,
професор кафедри тракторів та автомобілів
Національний університет біоресурсів і природокористування України
ORCID: 0000-0003-4954-2532

Т. В. ВОЛОБУЄВА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри машинобудування
Одеська державна академія будівництва та архітектури
ORCID: 0000-0003-0340-3326

І. Ю. КОБЗАР

старший викладач кафедри машинобудування
Одеська державна академія будівництва та архітектури
ORCID: 0009-0004-1778-9463

ПРАВОВІ АСПЕКТИ ПАСАЖИРСЬКИХ АВТОПЕРЕВЕЗЕНЬ

У статті розглянуто правові аспекти, що регулюють діяльність у сфері пасажирських автоперевезень як важливу компоненту транспортної системи України, яка забезпечує реалізацію права громадян на мобільність, доступ до соціальних та економічних ресурсів. Метою даної роботи є загальний аналіз правових аспектів пасажирських автоперевезень в Україні – від укладання договору перевезення до процедури ліцензування, впровадження цифрових технологій у правове поле пасажирських перевезень та державного контролю за діяльністю перевізників. У центрі дослідження перебувають норми цивільного, господарського та адміністративного законодавства, що регулюють взаємовідносини між перевізником та пасажиром. Обґрунтовано, що ефективна правова система є ключовим чинником безпеки перевезень та підвищення якості послуг і формування конкурентного ринку. Проаналізовано зміст договору перевезення пасажирів як юридичну основу взаємовідносин між споживачем і перевізником, порядок ліцензування перевізників, обов'язки сторін, а також систему контролю за дотриманням законодавства. Увага приділена впливу цифровізації на правові відносини в транспортній галузі. Зроблено висновок, що правове регулювання пасажирських автоперевезень є ключовим чинником забезпечення безпеки, стабільності та ефективності транспортної системи України. Правове регулювання визначає межі відповідальності учасників ринку, гарантує права пасажирів і встановлює вимоги до організації діяльності перевізників. Ефективне правове регулювання пасажирських автоперевезень забезпечує баланс між економічними інтересами перевізників, державним контролем і правами пасажирів. Поєднання правових норм із цифровими інноваціями формує сучасну модель транспортної політики, що орієнтована на безпеку, прозорість і соціальну відповідальність. Наголошується на необхідності гармонізації національного законодавства із європейськими стандартами у сфері транспортних послуг, що є передумовою підвищення конкурентоспроможності українських перевізників та захисту прав споживачів.

Ключові слова: пасажирські автоперевезення, правові аспекти, правове регулювання, договір перевезення, ліцензування, цифрові технології транспорту, євроінтеграція.

O. V. STEPANOV

Doctor of Technical Sciences,
Professor at the Department of Tractors and Cars
National University of Bioresources and Environmental Management of Ukraine
ORCID: 0000-0003-4954-2532

T. V. VOLOBUEVA

Ph.D., Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering
Odesa State Academy of Construction and Architecture
ORCID: 0000-0003-0340-3326

I. YU. KOBZAR

Senior Lecturer at the Department of Mechanical Engineering

Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture

ORCID: 0009-0004-1778-9463

LEGAL ASPECTS OF PASSENGER ROAD TRANSPORT

The article examines the legal aspects governing passenger road transport activities as an important component of Ukraine's transport system, which ensures the realization of citizens' right to mobility and access to social and economic resources. The purpose of this work is to provide a general analysis of the legal aspects of passenger road transport in Ukraine, from the conclusion of a transport agreement to the licensing procedure, the introduction of digital technologies into the legal field of passenger transport, and state control over the activities of carriers. The study focuses on the norms of civil, commercial, and administrative legislation that regulate the relationship between the carrier and the passenger. It is argued that an effective legal system is a key factor in transport safety, improving the quality of services, and forming a competitive market. The content of the passenger transportation agreement as the legal basis for relations between the consumer and the carrier; the procedure for licensing carriers, the obligations of the parties, and the system for monitoring compliance with legislation are analyzed. Attention is paid to the impact of digitalization on legal relations in the transport industry. It is concluded that the legal regulation of passenger road transport is a key factor in ensuring the safety, stability, and efficiency of Ukraine's transport system. Legal regulation defines the limits of responsibility of market participants, guarantees the rights of passengers, and establishes requirements for the organization of carriers' activities. Effective legal regulation of passenger road transport ensures a balance between the economic interests of carriers, state control, and passenger rights. The combination of legal norms and digital innovations forms a modern model of transport policy focused on safety, transparency, and social responsibility. The need to harmonize national legislation with European standards in the field of transport services is emphasized, which is a prerequisite for increasing the competitiveness of Ukrainian carriers and protecting consumer rights.

Key words: passenger road transport, legal aspects, legal regulation, transport agreement, licensing, digital transport technologies, European integration.

Постановка проблеми

Пасажирські автоперевезення – одна з найважливіших сфер транспортної галузі, що забезпечує мобільність населення, розвиток економічних зв'язків та реалізацію соціальних прав громадян. При цьому система нормативно-правового забезпечення перевезень визначає укладення договорів, отримання ліцензій, порядок організації маршрутів, здійснення контролю та відповідальності перевізників. Водночас сучасні виклики: цифровізація, екологічна модернізація та євроінтеграційні процеси потребують адаптації національного законодавства до європейських стандартів транспорту. Без чіткого правового регулювання у сфері пасажирських автоперевезень неможливо гарантувати належний рівень безпеки, якості обслуговування та конкуренції між перевізниками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В Україні на законодавчому рівні розроблено нормативні правові акти в галузі транспорту. Були прийняті Цивільний кодекс України [1], Господарський кодекс України [2], Кодекс України про адміністративні правопорушення [3], Кримінальний кодекс України [4]. Крім того, Закони України «Про транспорт» [5], «Про автомобільний транспорт», «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо дорожньо-транспортних пригод та виплати страхового відшкодування» [7], «Про ліцензування видів господарської діяльності» [8]. Постанови Кабінету Міністрів України «Про Правила дорожнього руху» [9], «Про затвердження Правил надання послуг пасажирського автомобільного транспорту» [10], «Про затвердження Ліцензійних умов провадження господарської діяльності з перевезення пасажирів» [11] тощо. Значна увага приділяється й гармонізації законодавства України з європейськими стандартами [12–14].

Питання пасажирських автоперевезень у своїх роботах досліджували О. Ю. Бурдик [15], І. Гриценко [16], Т. І. Сліпуха [19], І. С. Кліменко [17], В. Литвин [18] й багато інших.

Аналіз робіт з пасажирських автоперевезень призводить до висновку, що аспекти правового регулювання пасажирських автоперевезень слугують фундаментом для забезпечення безпечного, якісного та надійного транспортного обслуговування громадян.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є загальний аналіз правових аспектів пасажирських автоперевезень в Україні від укладання договору перевезення до процедури ліцензування, впровадження цифрових технологій у правове поле пасажирських перевезень та державного контролю за діяльністю перевізників.

Викладення основного матеріалу дослідження

Правове регулювання перевезень пасажирів в Україні має чітку нормативно-правову основу, яка визначає правила, права, обов'язки та порядок відповідальності сторін. Застосування правового регулювання дозволяє

забезпечити баланс між економічними інтересами перевізника та правами пасажирів як споживачів транспортних послуг. Проведемо загальний аналіз правових аспектів пасажирських автоперевезень в Україні.

Цивільний кодекс України (2003) [1] визначає загальні засади укладення договорів перевезення пасажирів та багажу. Він встановлює, що договір перевезення є двостороннім правовим зобов'язанням, за яким перевізник бере на себе обов'язок доставити пасажирів до пункту призначення у встановлений строк. Відповідно пасажир – своєчасно сплатити вартість проїзду і дотримуватися правил користування транспортом. Кодекс визначає механізми відповідальності сторін у разі порушення умов договору. Важливим положенням є право пасажирів вимагати відшкодування збитків, спричинених неналежним виконанням договору. При цьому підкреслюється пріоритет прав споживачів транспортних послуг та гарантує можливість захисту цих прав у судовому порядку.

Зазначимо, що *Господарський кодекс України*, який діяв з 2003 року [2], втратив чинність 28.08.2025 року на підставі Закону України «Про особливості регулювання діяльності юридичних осіб окремих організаційно-правових форм у перехідний період та об'єднань юридичних осіб» від 09.01.2025 р. № 4196-IX.

Кодекс України про адміністративні правопорушення [3] разом з Цивільним кодексом України містять норми щодо відшкодування шкоди життю, здоров'ю або майну пасажирів. Якщо перевізник порушує вимоги безпеки, не виконує умов договору або неналежно утримує транспортний засіб, пасажир має право на компенсацію. У випадках, коли порушення правил перевезення призвело до шкоди, залежно від тяжкості наслідків може наставати не лише матеріальна, але й адміністративна або навіть кримінальна відповідальність [4].

Закон України «Про транспорт» (1994) [5] – це базовий нормативно-правовий акт, який визначає загальні принципи функціонування транспортної системи держави, формує загальнодержавну політику у сфері транспортної діяльності. Закон визначає вимоги до організації перевезень та державного регулювання галузі. При цьому охоплюються базові питання від формування транспортної інфраструктури до забезпечення руху та захисту прав пасажирів.

Закон України «Про автомобільний транспорт» (2001) [6] – основний нормативно-правовий акт, що регулює діяльність у сфері автомобільних перевезень пасажирів та вантажів. Він встановлює вимоги до перевізників, водіїв, транспортних засобів, визначає порядок доступу до ринку автоперевезень, стандарти якості та безпеки надання послуг. Закон регламентує права пасажирів, включаючи право на інформацію, належну якість обслуговування, безпечні умови поїздки та відшкодування збитків за порушення зобов'язань перевізником.

Закон України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо дорожньо-транспортних пригод та виплати страхового відшкодування» (2011) [7] надає визначення «дорожньо-транспортна пригода» (ДТП) як події під час руху транспортного засобу, внаслідок якої поранені або загинули люди чи завдані матеріальні збитки. Закон регулює відносини страхування відповідальності власників транспортних засобів та чітким встановленням прав потерпілих на страхове відшкодування. Зокрема, оформлення ДТП (коли немає травмованих чи загиблих) та можливість використання спрощеної процедури (європротоколу) для оформлення ДТП без втручання правоохоронних органів.

Закон України «Про ліцензування видів господарської діяльності» (2015) [8] – основний нормативно-правовий акт, який визначає правові та організаційні засади ліцензування певних видів господарської діяльності в Україні. Закон визначає перелік видів діяльності, що підлягають обов'язковому ліцензуванню. Зокрема, комерційні перевезення пасажирів автомобільним транспортом. Він спрямований на запобігання діяльності нелегальних перевізників, створення рівних умов конкуренції та підвищення якості послуг для споживачів.

Підзаконні нормативні акти, зокрема *Постанова Кабінету Міністрів «Правила надання послуг пасажирського автомобільного транспорту»* (1997) [10]. Правила охоплюють перевезення організованих груп дітей, туристів, обслуговування пасажирів на автостанціях тощо. Даються визначення ключових термінів: автобус, таксі, маршрут, пасажир, квиток, багаж, нерегулярне/регулярне перевезення тощо. Правила визначають порядок здійснення міських, приміських, міжміських і міжнародних перевезень пасажирів і їхнього багажу автомобільним транспортом.

Міські та приміські перевезення організовуються переважно за рішенням органів місцевого самоврядування. Вони визначають маршрути, графіки, тарифи, а також проводять конкурси для визначення перевізників. У цьому випадку договір перевізника з органом влади має ознаки публічного договору і підлягає контролю з боку державних структур.

Міжміські перевезення здійснюються з дозволу обласних державних адміністрацій, передбачають особливі вимоги до безпеки та тривалості рейсів. Перевезення передбачають дотримання більш суворих вимог до безпеки, часу керування, відпочинку водіїв і технічного стану транспорту. У цих перевезеннях велике значення має наявність системи GPS-моніторингу, тахографів та електронної фіксації рейсів.

Міжнародні перевезення регулюються як національними, так і міжнародним правом. Зокрема, Європейською угодою про роботу екіпажів транспортних засобів (ЄУТР), Конвенцією про дорожній рух (CMR), Регламентами Європейського Союзу тощо. Для їх здійснення потрібні спеціальні дозволи, ліцензійні картки на кожен автобус, страховки та сертифікати відповідності [12–14].

Постанова Кабінету Міністрів «Про затвердження Ліцензійних умов провадження господарської діяльності з перевезення пасажирів, небезпечних вантажів та небезпечних відходів автомобільним транспортом, міжнародних перевезень пасажирів та вантажів автомобільним транспортом» № 1001 від 02.12.2015 р. [11]. Постанова визначає вимоги до матеріально-технічної бази перевізника, наявності технічного справного транспорту, професійного рівня персоналу. Зокрема, окреслюється порядок подачі документів для отримання ліцензії, встановлюються критерії перевірки, що дозволяють державі контролювати реальну готовність перевізника до надання послуг.

Перелічені нормативно-правові акти формують цілісну систему регулювання діяльності у сфері пасажирських перевезень. Вони охоплюють ключові напрями: порядок укладення договорів перевезення, вимоги до технічного стану транспортних засобів, відповідальність перевізників, права пасажирів, правила ліцензування та державного контролю тощо.

Сучасні нормативно-правові акти враховують й тенденції цифровізації: поширення електронних квитків, використання мобільних додатків для бронювання поїздок, онлайн-оплати та електронних систем контролю. Це спрощує доступ пасажирів до транспортних послуг і робить процес перевезень прозорішим.

Отже, система правового регулювання перевезень пасажирів в Україні є комплексною та багаторівневою. Вона охоплює як загальні положення договірних відносин, так і деталізує специфіку перевезень окремими видами транспорту. Законодавче забезпечення гарантує дотримання прав пасажирів, чітко встановлює обов'язки перевізника та створює механізми відповідальності за порушення.

Розглянемо деякі правові положення пасажирських автоперевезень докладніше. Відповідно до Цивільного кодексу України (ст. 910) [1], договір перевезення пасажирів є підставою для надання транспортних послуг. Договір є базовим елементом у системі правового регулювання автоперевезень. Його зміст визначений у Цивільному кодексі України, Законі України «Про транспорт» і Правилах надання послуг пасажирського автомобільного транспорту. Фактично договір укладається з моменту придбання послуги до місця призначення у визначений строк і в безпечних умовах.

Сторонами договору виступають перевізник і пасажир. Перший бере на себе зобов'язання здійснити перевезення відповідно до чинних норм і стандартів. Другий зобов'язується оплатити послугу та дотримуватися встановлених правил поведінки під час поїздки. Важливими частинами договору є маршрут, час відправлення, категорія транспортного засобу, права пасажирів на пільги, а також порядок відшкодування збитків у разі затримки або скасування рейсу.

Особливою умовою є обов'язкове страхування пасажирів від нещасних випадків відповідно до Закону України «Про страхування» [9]. Це створює додаткові гарантії захисту життя та здоров'я пасажирів. Страхування має не лише юридичне, а й соціальне значення. Договір гарантує відшкодування шкоди у випадках травмування чи загибелі пасажирів під час поїздки, що сталися не з вини пасажирів.

У межах правових відносин між пасажиром і перевізником чітко розмежовано права та обов'язки. Пасажир має право на безпечне, своєчасне й комфортне перевезення, а також на отримання повної інформації про маршрут, тариф та тривалість поїздки. Він також може звертатися з претензіями у разі неналежного надання послуги. Особливе значення має право пасажирів на захист від дискримінації, що передбачає рівний доступ до транспортних послуг для осіб з інвалідністю, літніх людей чи маломобільних груп населення.

Згідно зі ст. 35 Закону України «Про автомобільний транспорт» [6], перевізник зобов'язаний: дотримуватися затверджених маршрутів, графіків руху та тарифів, забезпечувати справність, технічний і санітарний стан автотранспорту, дотримання екологічних стандартів, страхувати пасажирів, забезпечувати кваліфікацію персоналу та контроль безпеки руху. Законодавство вимагає, щоб усі водії, які здійснюють перевезення пасажирів, проходили регулярні медичні огляди та мали відповідну категорію водійського посвідчення.

Недотримання цих вимог може стати підставою для позбавлення ліцензії або відповідальності залежно від характеру порушення. Зокрема, цивільна правова відповідальність настає у разі порушення договірних зобов'язань: затримки, пошкодження багажу, відмови у перевезенні. Адміністративна відповідальність – за перевезення без ліцензії, недотримання технічних вимог, перевищення кількості пасажирів. Кримінальна відповідальність настає, коли внаслідок порушення правил безпеки дорожнього руху завдано шкоди життю чи здоров'ю людей. У таких випадках до відповідальності можуть притягуватись як водії, так і службові особи підприємства.

Контроль за дотриманням законодавства здійснюють кілька інституцій. Державна служба України з безпеки на транспорті (Укртрансбезпека) контролює дотримання ліцензійних умов, веде реєстр перевізників і проводить перевірки. Національна поліція контролює дотримання Правил дорожнього руху.

Державна служба України з питань безпеки харчових продуктів та захисту споживачів (Держпродспоживслужба) слідкує за дотриманням прав споживачів у транспортній сфері. Органи місцевого самоврядування відповідають за безпеку маршрутів, роботу перевізників на своїй території та якість перевезення.

Крім того, з 2020-х років в Україні активно впроваджується система електронного контролю; цифрові тахографи, GPS-моніторинг маршрутів, електронні квитки та реєстри ліцензіатів. Важливо, що перевізник несе

відповідальність не лише перед пасажиром, але й перед державою – за дотримання умов ліцензування, податкових вимог і правил охорони праці.

Відповідно до цього одним із ключових елементів правового забезпечення пасажирських перевезень є система ліцензування. Вона спрямована на забезпечення безпеки, законності та конкурентності на ринку транспортних послуг. Це визначено Законом України «Про ліцензування видів господарської діяльності» [8] та Постановою Кабінету Міністрів України «Про затвердження Ліцензійних умов провадження господарської діяльності з перевезення пасажирів, небезпечних вантажів та небезпечних відходів автомобільним транспортом, міжнародних перевезень пасажирів та вантажів автомобільним транспортом» № 1001 від 02.12.2015 р. [11].

Для отримання ліцензії перевізник повинен мати транспортні засоби, що відповідають технічним і екологічним вимогам, забезпечити наявність бази технічного обслуговування, організувати медичний контроль водіїв, вести облік робочого часу та відпочинку (застосування тахографів), впровадити систему управління безпекою перевезень.

Відповідно до Закону України «Про ліцензування видів господарської діяльності» [8], ліцензія підтверджує, що суб'єкт господарювання відповідає всім встановленим критеріям безпеки, технічного стану транспортних засобів і кваліфікації персоналу. Органом ліцензування виступає Укртрансбезпека. Вона підтверджує право суб'єкта господарювання здійснювати пасажирські перевезення та засвідчує його відповідність технічним, кадровим і організаційним вимогам.

Для отримання ліцензії перевізник подає пакет документів, що містить відомості про наявність транспортних засобів, бази технічного обслуговування, медичні огляди водіїв, систему управління безпекою руху, а також підтвердження фінансової спроможності підприємства. Ліцензія видається на необмежений строк, однак за умови постійного дотримання вимог. У разі виявлення порушень, наприклад, відсутності техогляду, експлуатація несправного транспорту, порушення режиму праці водіїв, порушення вимог безпеки, трудового законодавства чи умов договору Укртрансбезпека може тимчасово призупинити дію ліцензії або її анулювати.

Останні роки характеризуються активним впровадженням цифрових технологій у правове поле пасажирських перевезень. Електронні квитки, цифрові ліцензії, онлайн-реєстри перевізників та інтегровані платформи моніторингу руху дозволяють забезпечити прозорість, запобігати порушенням і спростити контроль [16].

Змінилися підходи до організації перевезень та контролю діяльності перевізників. Так цифрові платформи забезпечують оперативність, прозорість та мінімізують ризики зловживань. Цифрові ліцензії та відкриті реєстри дозволяють органам контролю оперативно перевіряти правомірність діяльності перевізників, що значно ускладнює роботу нелегальних операторів та зменшує тіньовий сектор.

Системи GPS-моніторингу – ще один важливий компонент цифровізації транспортної сфери. Вони дозволяють відстежувати місцезнаходження автотранспорту, контролювати швидкісний режим, дотримання маршрутів та графіків. Завдяки цьому підвищується безпека перевезень і знижується ризик маніпуляцій із пробігом або використанням транспорту не за призначенням. Для держави впровадження GPS-нагляду означає можливість формувати аналітичні дані, що допомагають планувати інфраструктурні проекти та оптимізувати транспортні потоки.

Важливою перевагою цифровізації є зниження адміністративного навантаження. Завдяки електронному документообігу скорочується кількість перевірок на дорогах, оскільки інформація про транспортний засіб, маршрут, наявність ліцензії та інші дані доступні органам контролю в дистанційному режимі. Крім того, автоматизація процедур підвищує якість надання послуг та формує новий рівень культури обслуговування пасажирів – швидкий, зручний та орієнтований на користувача.

Цифрові інструменти також сприяють створенню прозорого конкурентного середовища. Відкриті реєстри дозволяють споживачам самостійно перевірити надійність перевізника, а державі – краще контролювати виконання законодавчих норм. У перспективі це формує довіру до транспортного ринку і стимулює прихід нових інвесторів.

Цифрова трансформація транспортної галузі в Україні також тісно пов'язана з процесом євроінтеграції та гармонізацією національного законодавства з нормативною базою Європейського Союзу (ЄС). Гармонізація законодавства України з європейськими стандартами (Регламент ЄС № 1071/2009 1073/2009) [13] передбачає: підвищення вимог до кваліфікації перевізників; контроль соціальних норм праці водіїв; посилення технічних і екологічних вимог; створення єдиного електронного простору транспортного простору транспортних послуг. Ці документи визначають ключові вимоги до доступу на ринок автоперевезень, встановлюють критерії професійної компетентності перевізників, умови фінансової надійності компаній, а також регламентують соціальні стандарти праці водіїв та безпеку транспортних засобів.

Запровадження європейських стандартів передбачає обов'язкове використання тахографів, систем фіксації часу керування, а також комплексних цифрових систем обміну інформацією між органами контролю різних країн. Це дозволяє підвищити рівень безпеки дорожнього руху та забезпечити чесну конкуренцію між перевізниками. Для України такий підхід є важливим не лише в контексті державного контролю, а й для підвищення репутації українських транспортних компаній на міжнародному ринку та забезпеченню належного рівня безпеки перевезень.

Висновки

Правові аспекти пасажирських автоперевезень формують основу організації безпечного, якісного та відповідального транспортного обслуговування населення. У центрі правового регулювання перебуває договір перевезення, який виступає юридичною основою взаємовідносин між пасажиром і перевізником, закріплюючи принципи відповідальності, прозорості та захисту інтересів обох сторін.

Система ліцензування виконує функцію державного контролю, що спрямована на запобігання порушенням у сфері транспорту, недопущення використання технічно несправних або невідповідних екологічним стандартам транспортних засобів. Поєднання договірних відносин між перевізником і пасажиром, обов'язкових ліцензійних процедур та використання сучасних цифрових інструментів забезпечує не лише прозорість діяльності, а й підвищення рівня відповідальності учасників ринку.

Запровадження електронних квитків, реєстрів перевізників, GPS-моніторингу транспортних засобів і онлайн-контролю за виконанням умов договору та змогу ефективніше відстежувати якість надання послуг та мінімізувати ризики для пасажирів. Поєднання правових норм із сучасними технологіями дозволить забезпечити стабільність і надійність транспортної системи, орієнтованої на потреби людини.

Європейський досвід свідчить, що ефективне регулювання пасажирських перевезень базується на поєднанні ліцензування, сертифікації персоналу, екологічних вимог і системи захисту прав споживачів. Гармонізація українського законодавства з європейськими нормами сприятиме формуванню конкурентного, безпечного й відкритого ринку пасажирських перевезень. Зокрема, поступове запровадження європейських норм сприяє зростанню конкурентоспроможності українських перевізників на міжнародному ринку та підвищенню рівня сервісу. При цьому ефективне правове регулювання є запорукою безпеки, якості обслуговування та захисту прав пасажирів.

Отже, сучасна правова модель пасажирських автоперевезень має поєднувати принципи законності, цифрової відкритості та соціальної відповідальності. Саме такий підхід забезпечить ефективне функціонування пасажирських перевезень, їх адаптацію до європейських стандартів та створення нової безпечної моделі пасажирських автоперевезень, яка орієнтована на потреби людини, що актуалізує подальші дослідження.

Список використаної літератури

1. Цивільний кодекс України від 16.01.2003 р. № 435-IV.
2. Господарський кодекс України від 16.01.2003 р. № 436-IV.
3. Кодекс України про адміністративні правопорушення від 07.12.1984 р. № 8073-X.
4. Кримінальний кодекс України від 05.04.2001 р. № 2341-III.
5. Закон України «Про транспорт». Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1994, № 51, ст.446, редакція від 01.01.2024, підстава – 1909-IX.
6. Закон України «Про автомобільний транспорт». Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2001, № 22, ст.1 05) {В редакції Закону № 3492-IV від 23.02.2006, ВВР, 2006, № 32, ст.273} із змінами і доповненнями.
7. Закон України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо дорожньо-транспортних пригод та виплати страхового відшкодування». Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2011, № 39, ст. 386, редакція від 17.02.2011.
8. Закон України «Про ліцензування видів господарської діяльності» Відомості Верховної Ради (ВВР), 2015 р. № 222-VIII.
9. Закон України «Про страхування». Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2021, № 1909-IX, редакція від 01.01.2025, підстава – 3720-IX.
10. Про затвердження Правил надання послуг пасажирського автомобільного транспорту. Постанова Кабінету Міністрів України від 18 лютого 1997 р. № 176, редакція 24.09.2025, підстава – 708-2025-п.
11. Про затвердження Ліцензійних умов провадження господарської діяльності з перевезення пасажирів. Постанова Кабінету Міністрів України № 1001 від 02.12.2015 р.
12. Європейська угода про роботу екіпажів транспортних засобів, що виконують міжнародні автомобільні перевезення (ЄУТР), 1970 р.
13. Регламенти Європейського Союзу № 1071/2009, № 1072/2009, № 1073/2009.
14. Правове регулювання сфери транспорту в Європейському Союзі та в Україні : у 2-х т. / ред. В. Г Дідик, М-во юстиції України, Державний департамент з питань адаптації законодавства. К. : Ніка-Прінт, 2006.
15. Бурдик О. Ю. Проблеми автобусних пасажирських перевезень у містах України та шляхи їх оптимізації. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2020. № 71. С. 68–74.
16. Гриценко І., Марченко Р. Вплив впровадження електронного квитка на управління пасажирськими перевезеннями. *Транспортні системи і технології*. 2021. № 4. С. 88–96.
17. Клименко І. С., Кривошеєва С. В., Кривенко О. Проблеми та перспективи розвитку ринку пасажирських автоперевезень в Україні. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2019. № 30. С. 12–18.

18. Литвин В. В. Оцінювання якості обслуговування пасажирів у міських автобусних перевезеннях. *Науковий вісник ХТУ*. 2022. № 39. С. 145–152.

19. Сліпуха Т. І. Аналіз сучасного стану ринку пасажирських перевезень в Україні. *Економіка і регіон*. 2021. № 3. С. 110–115.

References

1. Civil Code of Ukraine dated January 16, (2003) No. 435-IV.
2. Commercial Code of Ukraine dated January 16, (2003) No. 436-IV.
3. Administrative Offenses Code of Ukraine on dated December 7, (1984), No. 8073-X.
4. Criminal Code of Ukraine dated April 5, (2001) No. 2341-III.
5. Law of Ukraine “On Transport.” Information from the Verkhovna Rada of Ukraine (VVR), (1994) No. 51, Art. 446, edition dated January 01, 2024, basis – 1909-IX.
6. Law of Ukraine “On Motor Transport.” Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine (VVR), 2001, No. 22, Art. 1 05) {As amended by Law No. 3492-IV dated February 23, (2006), VVR, 2006, No. 32, Art. 273} with amendments and additions.
7. Law of Ukraine “On Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine Regarding Road Traffic Accidents and Insurance Compensation Payments.” Information from the Verkhovna Rada of Ukraine (VVR), (2011) No. 39, Art. 386, as amended on February 17, 2011.
8. Law of Ukraine “On Licensing of Economic Activities.” Information from the Verkhovna Rada (VVR), (2015) No. 222-VIII.
9. Law of Ukraine “On Insurance.” Information from the Verkhovna Rada of Ukraine (VVR), (2021) No. 1909-IX, revised on January 01, 2025, basis – 3720-IX.
10. On Traffic Rules. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated October 10, (2001) No. 1306, revised on December 01, 2023, basis – 1242-2023-p.
11. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1001 “On Approval of Licensing Conditions for Economic Activities in Passenger Transportation” dated December 02, 2015.
12. European Agreement concerning the Work of Crews of Vehicles Engaged in International Road Transport (AETR), 1970.
13. European Union Regulations No. 1071/2009, No. 1072/2009, No. 1073/2009.
14. Legal regulation of transport in the European Union and Ukraine: in 2 volumes / ed. V.G. Didyk, Ministry of Justice of Ukraine, State Department for the Adaptation of Legislation. Kyiv: Nika-Print, 2006.
15. Burdyk O.Yu. (2020) Problems of bus passenger transport in Ukrainian cities and ways to optimize it. *Bulletin of Transport and Industry Economics*. No. 71. Pp. 68–74.
16. Hrytsenko I., Marchenko R. (2021) The impact of electronic ticketing on passenger transport management. *Transport Systems and Technologies* No. 4. Pp. 88–96.
17. Klymenko I.S., Kryvosheeva S.V., Kryvenko O. (2019) Problems and prospects for the development of the passenger transport market in Ukraine. *Bulletin of Transport and Industry Economics*. No. 30. Pp. 12–18.
18. Lytvyn V.V. (2022) Assessment of the quality of passenger service in urban bus transport. *Scientific Bulletin of NTU*. No. 39. Pp. 145–152.
19. Slipukha T.I. (2021) Analysis of the current state of the passenger transport market in Ukraine. *Economy and Region*. No. 3. Pp. 110–115.

Дата першого надходження рукопису до видання: 13.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 10.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

О. В. СТЕПАНОВ

доктор технічних наук,
професор кафедри тракторів та автомобілів
Національний університет біоресурсів і природокористування України
ORCID: 0000-0003-4954-2532

Т. В. ВОЛОБУЄВА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри машинобудування
Одеська державна академія будівництва та архітектури
ORCID: 0000-0003-0340-3326

Т. О. КОЗАЧЕНКО

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри машинобудування
Одеська державна академія будівництва та архітектури
ORCID: 0000-0001-9034-3776

ОПТИМІЗАЦІЯ АВТОТРАНСПОРТНИХ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ В УКРАЇНІ: МОДЕЛЮВАННЯ МАРШРУТІВ ТА ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ПЛАТФОРМ

У статті розглянуто оптимізацію автотранспортних вантажних перевезень в умовах воєнного стану в Україні: моделювання маршрутів та використання цифрових платформ. Зазначено, що активні воєнні дії призвели до руйнування транспортної інфраструктури, пошкодження вантажних автотранспортних засобів та збоїв у системах управління, що створює комплекс ризиків для перевезень. Традиційні методи моделювання маршрутів вантажних перевезень у таких умовах виявляються недостатньо ефективними без використання цифрових платформ і телематичних систем. Метою дослідження є проведення аналізу стану автотранспортних вантажних перевезень в Україні з оцінкою факторів ризику, обґрунтування підходів до оптимізації маршрутів автотранспортних перевезень в умовах воєнного стану, використання сучасних цифрових платформ і методів моделювання, розроблення рекомендацій щодо впровадження цифрових інструментів у практику логістичних підприємств. Для оптимізації маршрутів запропоновано комбінований підхід, що поєднує класичні алгоритми графів, евристичні методи та методи математичного програмування. Увага приділена формалізації задач маршрутизації. Обґрунтовано доцільність використання цифрових платформ, які забезпечують моніторинг переміщення транспорту в реальному часі, автоматичне генерування альтернативних маршрутів та аналітичну обробку даних для прогнозування ризиків та планування логістичних операцій. Зроблено висновок, що оптимізація автотранспортних вантажних перевезень в умовах воєнного стану в Україні є надзвичайно актуальною і потребує комплексного підходу, який поєднує аналіз стану галузі, математичне моделювання маршрутів та використання цифрових платформ управління логістикою. Запропоновано рекомендації для практичного застосування оптимізації автотранспортних вантажних перевезень.

Ключові слова: автотранспорт, вантажні перевезення, ризики, оптимізація маршрутів, моделювання маршрутів, цифрові платформи.

O. V. STEPANOV

Doctor of Technical Sciences,
Professor at the Department of Tractors and Cars
National University of Bioresources and Environmental Management of Ukraine
ORCID: 0000-0003-4954-2532

T. V. VOLOBUEVA

Ph.D., Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering
Odesa State Academy of Construction and Architecture
ORCID: 0000-0003-0340-3326

T. O. KOZACHENKO

PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering
Odesa State Academy of Construction and Architecture
ORCID: 0000-0003-0340-3326

OPTIMIZATION OF MOTOR TRANSPORT FREIGHT TRANSPORTATION UNDER MARTIAL LAW IN UKRAINE: ROUTE MODELING AND USE OF DIGITAL PLATFORMS

The article discusses the optimization of motor transport freight transportation under martial law in Ukraine: route modeling and the use of digital platforms. It is noted that active military operations have led to the destruction of transport infrastructure, damage to freight vehicles, and disruptions in management systems, creating a range of risks for transportation. Traditional methods of modeling freight transport routes in such conditions are not effective enough without the use of digital platforms and telematic systems. The purpose of the study is to analyze the state of road freight transport in Ukraine, assess risk factors, justify approaches to optimizing road transport routes in conditions of martial law, use modern digital platforms and modeling methods, and develop recommendations for the implementation of digital tools in the practice of logistics companies. To optimize routes, a combined approach is proposed that combines classical graph algorithms, heuristic methods, and mathematical programming methods. Attention is paid to the formalization of routing tasks. The feasibility of using digital platforms that provide real-time monitoring of transport movements, automatic generation of alternative routes, and analytical data processing for risk forecasting and logistics operations planning is justified. It is concluded that the optimization of motor transport freight transportation in the conditions of martial law in Ukraine is extremely relevant and requires a comprehensive approach that combines analysis of the state of the industry, mathematical modeling of routes, and the use of digital logistics management platforms. Recommendations for the practical application of motor transport freight transportation optimization are proposed.

Key words: road transport, freight transport, risks, route optimization, route modeling, digital platforms.

Постановка проблеми

Сучасний стан автотранспортних вантажних перевезень в Україні характеризується значними труднощами, спричиненими поєднанням економічних, інфраструктурних і безпекових факторів. Під впливом воєнних подій вантажні автомобільні перевезення в Україні зазнали суттєвої трансформації. В умовах воєнного стану в Україні автотранспортні вантажні перевезення стикаються з нестабільністю логістичних ланцюгів, пошкодженням транспортної інфраструктури та витратами на забезпечення безпеки руху. Ці чинники призвели до необхідності переосмислення традиційних підходів до планування та управління перевізним процесом.

Водночас оптимізація маршрутів у кризових умовах вимагає застосування методів, що враховують ймовірність виникнення небезпечних ситуацій, доступність шляхів, рівень завантаженості доріг та тимчасові обмеження. Постає завдання щодо розроблення моделювання маршрутів з використанням цифрових технологій, яка дозволить підвищити стійкість логістичних систем до воєнних ризиків та забезпечити ефективне використання наявного автотранспортного ресурсу.

Таким чином, проблеми автотранспортних вантажних перевезень в умовах воєнного стану в Україні мають системний характер і охоплюють три взаємопов'язані рівні: технічний стан (стан автопарку); інфраструктурний (стан доріг і хабів); управлінсько-технологічний (відсутність цифрової інтеграції). Їх подолання потребує комплексного підходу з використанням інструментів оптимізації та цифрового моніторингу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Автотранспортні вантажні перевезення, як важливі елементи економіки України, розглядалися у різнопланових працях В. М. Білоуса [4], Н. Васильціва [5], О. С. Григор'єва [7], І. М. Козаченка [9], О. Костенка [11], С. В. Петренка [10] й ін. У своїх роботах науковці доводять, що автомобільний вантажний транспорт отримує перевагу там, де інші види транспорту не ефективні. Зокрема, доступ до віддалених регіонів, можливість роботи в тяжких умовах, більш оперативне перенаправлення вантажів. Було відзначено, що автотранспортні вантажні перевезення в умовах воєнного стану в Україні виступають важливим елементом забезпечення стійкості логістичних систем, але перебувають під впливом різних факторів ризику.

Під час війни, за попередніми даними Державної служби статистики України, обсяг вантажних перевезень усіма видами транспорту за січень-липень 2025 року становив 181,2 млн тонн, що на 12,6% менше ніж за аналогічний період 2024 року [3]. Вантажообіг за той же період скоротився ще більше – на 13,5% (до 94,37 млрд тонн) [3]. Автомобільним транспортом за сім місяців 2025 року перевезено на 11% менше вантажів ніж на аналогічний період 2024 року. Ці фактори підкреслюють, що питання ефективного планування маршрутів, управління ризиками та використання сучасних технологій стають критично необхідними для утримання безперервності вантажного перевізного процесу.

Попри згадані складнощі, автомобільний вантажний транспорт продовжує займати важливе місце в логістичній системі України. Зокрема, це пов'язано із його здатністю до більш гнучкої адаптації маршрутів, обходу

пошкоджених або обмежених ділянок. Отже, автотransпортні вантажні перевезення виступають як сегмент з високим потенціалом адаптації для вдосконалення через впровадження моделей оптимізації, цифрових платформ і систем моніторингу.

Формування мети дослідження

Метою дослідження є проведення аналізу стану автотransпортних вантажних перевезень в Україні з оцінкою факторів ризику, обґрунтування підходів до оптимізації маршрутів автотransпортних перевезень в умовах воєнного стану, використання сучасних цифрових платформ і методів моделювання, розроблення рекомендацій щодо впровадження цифрових інструментів у практику логістичних підприємств.

Викладення основного матеріалу дослідження

Воєнний стан та активні воєнні дії в Україні [1, 2] створили спектр проблем (ризиків) для автотransпортних вантажних перевезень. По-перше, порушення або руйнування транспортних шляхів та мереж, транспортних вузлів та об'єктів, автотransпортних засобів, систем управління та безпеки. По-друге, безпекові ризики, тобто сукупність загроз, подій або факторів (обстріли, мінування, небезпека руху в зоні активних дій), які можуть завдати шкоди людям, майну, довкіллю чи функціонуванню системи.

Однією з ключових проблем залишається фізичне зношення транспортних засобів. За оцінками галузевих експертів, середній вік вантажного автопарку перевищує 17 років, що суттєво впливає на паливну ефективність, рівень безпеки та викиди шкідливих речовин [12]. Під час воєнного стану оновлення техніки майже припинено через ускладнення імпорту й фінансові обмеження перевізників. Не менш суттєвим чинником є дефіцит кваліфікованих водіїв, особливо у сегменті міжнародних перевезень, оскільки частина фахівців була мобілізована або виїхала за кордон.

Наступною проблемою є поява нових логістичних невизначеностей. Руйнування мостів, доріг і логістичних хабів у центральних і східних регіонах призвело до зміщення вантажопотоків на захід країни, що створює «затори» в пунктах пропуску та на головних магістралях [22]. У таких умовах традиційні методи планування перевезень втрачають ефективність, а без цифрових інструментів координація процесів стає практично неможливою.

Більшість приватних перевізників не мають інтегрованих систем GPS-моніторингу, електронного документообігу чи автоматизованого планування маршрутів. Це призводить до неузгодженості дій між відправниками, перевізниками та отримувачами, затримок у передачі інформації та зниження ефективності. Як визначено у фаховому огляді Європейської Бізнес Асоціації, лише 20-25% українських транспортних логістичних компаній використовують програмні платформи для управління перевезеннями на рівні, близькому до європейських стандартів [8].

Попри численні проблеми автотransпортні вантажні перевезення мають значний потенціал розвитку шляхом інноваційних та цифрових рішень. Передусім, актуальним напрямом є впровадження інтелектуальних транспортних систем (ІТС) [6, 16, 17], які дозволяють об'єднати інформацію про рух транспорту, стан доріг, погодні умови тощо. Використання ІТС сприяє підвищенню точності планування маршрутів, скороченню простоїв, час проходження контрольно-пропускних пунктів та оперативне реагування на зміни ситуації під час воєнного стану.

Окремої уваги заслуговує перспектива застосування математичного моделювання маршрутів з урахуванням ризикових факторів. Використання алгоритмів теорії графів, генетичних алгоритмів або стохастичного моделювання дозволяє будувати маршрути, які мінімізують не лише витрати, а й імовірність потрапляння в небезпечні зони.

Крім того, вагомими залишаються організаційні перспективи. Зокрема, створення національного центру моніторингу логістичних ризиків, розроблення нормативної бази для обміну даними між перевізниками, військовими адміністраціями та місцевою владою, а також стимулювання оновлення автопарку через пільгові програми фінансування.

Отже, тенденції розвитку автотransпортних перевезень в Україні вказують на перехід до цифрової моделі управління. Її реалізація можлива лише за умов інтеграції наукових розробок, державного регулювання й ініціатив приватного сектору. У цьому контексті дослідження питань оптимізації маршрутів в умовах воєнного стану є не лише теоретично значущим, а й практично необхідним для забезпечення стабільності національної економіки та підтримки оборонної логістики.

Досліджуючи автотransпортні вантажні перевезення розглянемо концепцію оптимізації маршрутів автотransпортних вантажних перевезень в умовах воєнного стану. Це передбачає методи оптимізації маршрутів, формалізацію задачі маршрутизації, моделювання маршрутів з урахуванням воєнних ризиків та використання цифрових платформ у плануванні оптимальних маршрутів.

Оптимізація маршрутів вантажних автоперевезень ґрунтується на поєднанні кількох груп методів, кожна з яких має власні переваги щодо точності, обчислюваної складності та придатності до динамічних транспортних умов. До класичних підходів (методів) належать:

1. Класичні алгоритми графів, зокрема алгоритм Дейкстри та алгоритм Беллмана-Форда, які забезпечують знаходження найкоротшого шляху з урахуванням вагових коефіцієнтів, що можуть відображати не лише відстань, а й час поїздки, стан дорожнього покриття чи рівень загроз на окремих ділянках [14, 20].

2. Евристичні методи, які використовуються у складних транспортних мережах, де кількість можливих варіантів різко зростає. Генетичні алгоритми, метод мурашиних колоній та алгоритм імітації відпаду демонструють здатність знаходити квазіоптимальні рішення за прийнятний час, особливо коли маршрут повинен враховувати додаткові параметри: завантаженість доріг, обмеження руху, наявність небезпечних зон або оперативні зміни в інфраструктурі [15].

3. Методи математичного програмування. Лінійні та цілочисельні моделі дозволяють формувати маршрути з урахуванням конкретних обмежень – часових вікон, вантажності транспортних засобів, вимог безпеки та логістичних пріоритетів. Їх застосування у транспортній оптимізації детально розглянуто в роботах [21].

Вибір методу залежить від розміру транспортної мережі, динаміки змін ризикових зон, доступності даних про дороги та характеру ризиків. На практиці рекомендується комбінування методів: спочатку визначаються допустимі маршрути за алгоритмами графів, після чого обирається оптимальний шлях із використанням евристичних або програмних методів з урахуванням усіх експлуатаційних та безпекових критеріїв.

Формалізацію задачі маршрутизації можна представити у вигляді мережі:

$$G = (V, E), \quad (1)$$

де V – множина вузлів (пункти відправлення, приймання вантажу та проміжні пункти);

E – множина дуг, що з'єднують вузли.

Кожна дуга характеризується трьома показниками: довжина d_{ij} , час проходження t_{ij} та коефіцієнт ризику r_{ij} .

Задачу маршрутизації можна сформулювати як пошук шляху P від вузла відправлення v_s , до вузла призначення v_d , який мінімізує функцію цілі:

$$F(P) = \alpha \sum_{(i,j) \in P} t_{ij} + \beta \sum_{(i,j) \in P} d_{ij} + \gamma \sum_{(i,j) \in P} r_{ij}, \quad (2)$$

де α , β , γ – вігові коефіцієнти, що відображають тип вантажу, умов перевезення та поточної ситуації на маршруті.

Вибір ваги визначається залежно від типу вантажу, умов перевезення та поточної ситуації на маршруті.

Для моделювання маршрутів в умовах воєнного стану (ризiku) доцільно застосовувати комбінований підхід, який поєднує математичні методи оптимізації та аналіз оперативних даних із цифрових логістичних платформ. Розглянемо основні етапи моделювання маршрутів.

Перший етап – формування мережі маршрутів. Формується мережа можливих маршрутів, що включає всі доступні дороги, транспортні вузли та об'їзні шляхи. Для цього використовуються відкриті картографічні дані та офіційні джерела щодо стану інфраструктури, зокрема інформаційні ресурси Державного агентства автомобільних доріг України [13].

Другий етап – присвоєння ризикових коефіцієнтів. Кожній дузі транспортної мережі присвоюється ризиковий коефіцієнт, що враховує рівень загроз у конкретному районі. Такі коефіцієнти формуються на основі актуальних повідомлень про безпечну ситуацію, включаючи дані ДСНС, військових адміністрацій та відкритих джерел ситуаційної обізнаності. Це дозволяє кількісно оцінити ймовірність перешкод або загроз на конкретних ділянках дороги.

Третій етап – оптимізація маршрутів. Оптимізація маршрутів здійснюється через мінімізацію цільової функції $F(P)$, що одночасно враховує час у дорозі, протяжність маршруту та інтегральний показник ризику. До відповідних методів належать алгоритми оптимізації на графах, зокрема модифіковані варіації алгоритмів Дейкстри з вагами, скоригованими на небезпеку [7].

Четвертий етап – валідація результатів. Завершальним етапом є валідація розрахованих маршрутів за даними GPS-моніторингу та фактичного руху транспорту. Порівняння прогнозних і реальних траєкторій дозволяє коригувати модель та підвищувати точність наступних розрахунків.

Такий підхід забезпечує адаптивність логістичних рішень у динамічних умовах воєнного стану та створює підґрунтя для інтеграції з цифровими платформами управління перевезеннями. Наприклад, такі сервіси, як *Logix*, *Trans.eu*, *Lardi-Trans*, *TMS-Logist* або *Digital Logistics Hub* [18], уже функціонують на ринку України, але їхнє використання залишається обмеженим. Тобто розвиток цифрових платформ є вагомим чинником оптимізації маршрутів та управління логістикою. При цьому відзначимо, що перевагою цифрових платформ є можливість інтеграції в режимі реального часу. Це дозволяє перевізникам швидко реагувати на нові замовлення, оцінювати безпечність маршрутів та координувати дії з партнерами [23].

Для управління вантажними перевезеннями цифрові платформи формують комплексну інформаційну інфраструктуру, що забезпечує інтеграцію різномірних даних про дорожню мережу, інтенсивність руху, потенційні ризики та метеорологічні умови. Застосування цифрових платформ дає змогу підвищити оперативність управлінських рішень і зменшити ймовірність виникнення критичних ситуацій [23]. Завдяки використанню телематичних модулів, GPS-трекерів, даних супутникового спостереження та мобільних застосунків такі платформи створюють єдине інформаційне середовище для оперативного та стратегічного планування логістичних операцій.

Ключовими функціональними можливостями цифрових платформ є моніторинг переміщення автомобільного транспорту в реальному часі. При цьому оцінюється безпечність доступних маршрутів та визначаються оптимальні шляхи для обходу небезпечних ділянок. У разі зміни дорожньої обстановки або погодних факторів система здатна автоматично генерувати альтернативні маршрути, враховуючи обмеження руху та пріоритети користувача [19].

Додатково цифрові платформи забезпечують збір, структурування та аналітичну обробку даних, що створює підґрунтя для побудови прогнозних моделей та удосконалення логістичних процесів. Особливої значущості ця функціональність набуває в умовах нестабільної транспортної інфраструктури під час воєнного стану, коли ситуація на дорогах може змінюватися протягом кількох хвилин.

Крім того, узагальнений масив даних, який накопичений цифровими платформами, використовується для подальшого аналітичного моделювання. Зокрема, прогнозування ризиків, оцінювання пропускнуєї спроможності маршрутів, удосконалення логістичних стратегій і планування навантаження транспортної мережі, використання інформації із GPS-трекерів, супутникових даних та мобільних додатків для водіїв. Наприклад, система може відстежувати блокування доріг або її перевантаження і миттєво перераховувати оптимальний маршрут для водія.

Серед переваг використання цифрових платформ відзначимо: адаптивність до динамічних змін дорожньої ситуації; зменшення часу перевезення та експлуатаційних витрат; підвищення безпеки перевезень; можливість інтеграції з наявними системами GPS та логістики.

Разом з тим відзначимо й деякі обмеження щодо використання цифрових платформ: потреба у постійному оновленні даних про дороги та безпечні зони; складність оцінки вагових коефіцієнтів для комбінованої функції цілі; необхідність навчання персоналу та адаптації підприємств до цифрових платформ.

Таким чином, комбіноване використання математичного моделювання та цифрових платформ дозволяє досягти ефективного управління маршрутами автотранспортних вантажних перевезень в умовах високої невизначеності (ризик) воєнного стану. При цьому цифрові платформи виконують подвійну роль – як інструмент оперативного управління та як засіб підвищення стратегічної стійкості транспортної системи.

Висновки

Оптимізація автотранспортних вантажних перевезень в умовах воєнного стану в Україні є надзвичайно актуальним питанням і потребує комплексного підходу. При цьому комплексний підхід поєднує аналіз стану галузі, математичне моделювання маршрутів та використання цифрових платформ для управління логістикою.

Методичний підхід до оптимізації маршрутів вантажних перевезень включає формалізацію транспортної мережі як графа, що враховує відстань, час проходження та рівень ризику. Для розв'язання таких задач застосовуються комбіновані методи оптимізації – класичні алгоритми графів, евристичні підходи та математичне програмування. Така методика дозволяє адаптивно реагувати на змінні умови та обирати маршрути з мінімальними витратами та ризиками.

Використання цифрових платформ для інтеграції даних про стан доріг, транспортних потоків та ризиків дозволяє скоротити час перевезення, зменшити витрати пального, підвищити безпеку руху та безпеку вантажів. Запропоновані підходи можуть бути впроваджені в умовах невизначеності як у комерційних вантажних перевезеннях, так і у військово-цивільній логістиці, що сприяє стабілізації автотранспортних вантажних потоків.

Для практичного застосування оптимізації автотранспортних вантажних перевезень пропонується наступне: впровадження цифрових платформ та телематичних систем; регулярне оновлення даних про стан інфраструктури та безпеку маршрутів; використання комбінованих методів оптимізації маршрутів для адаптивного планування перевезень; розробка нормативних та організаційних механізмів адміністраціями, що актуалізує подальші дослідження.

Список використаної літератури

1. Про засади державної політики національної пам'яті Українського народу. Закон України від 21 серпня 2025 року № 4579-IX. Прийняття від 21.08.2025.
2. Про воєнний стан. Укази Президента України № 64/2022 від 24 лютого 2022 року.
3. Державна служба статистики України. URL: <http://ukrstat.gov.ua/>
4. Білоус В.М., Григор'єв О.С. Математичне моделювання логістичних процесів автотранспорту. *Вісник транспортної науки*. 2021. № 2. С. 15–27.
5. Васильців Н. Трансформація та адаптація логістики до викликів в умовах воєнного стану. *Економіка та суспільство*, 2023. № 55. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-55-78>
6. Venger A. Stepanov O. Intelligent transportation systems in the transport process. *Комунальне господарство міст : наук.-техн. зб. Серія : Технічні науки та архітектура*, 2021. Том 1. № 161. С. 212–217.
7. Григор'єв О.С. Методи оптимізації маршрутів вантажного автотранспорту. *Транспорт України*. 2022. № 3. С. 45–54.
8. Європейська Бізнес Асоціація. Логістика в Україні: ринок та тенденції 2024 / ЕБА. Київ, 2024. 56 с. URL: <https://eba.com.ua/logistics-2024-report>

9. Козаченко І.М. Цифрові платформи у вантажоперевезеннях: проблеми та перспективи. *Логістика та управління ланцюгами поставок*. 2021. Т. 12, № 4. С. 32–41.
10. Козаченко І.М., Петренко С.В. Сучасні цифрові рішення в управлінні транспортними потоками. *Логістика та інформаційні технології*, 2022. № 1. С. 9–19.
11. Костенко О., Черненко В., Куличков А. Цифрова трансформація логістичного управління вантажними перевезеннями в Україні: інституційні виклики та євроінтеграційні перспективи. *Сталий розвиток економіки*, 2025. № 5 (56), С. 425–431. <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2025-56-58>
12. Сучасні тенденції розвитку транспортної галузі. *Логістика України*, 2023. URL: <https://logistics-ua.com>
13. Транспортні платформи в Україні: актуальність та можливості / Trans.eu, 2024. URL: <https://www.trans.eu/ua/blog/transportni-platformy-ukrayiny-2024>
14. Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2022) *Introduction to algorithms* (4th ed.). MIT Press.
15. Dorigo, M., & Stützle, T. (2019) „Ant Colony Optimization: Overview and Recent Advances“. In M. Gendreau & J.-Y. Potvin (Eds.), *Handbook of Metaheuristics* (3rd ed., International Series in Operations Research & Management Science, Vol. 272, pp. 311–351). Springer, Cham.
16. Diderot, C. D., Bernice, N. W. A., Tchappi, I., Mualla, Y., Najjar, A., Galland, S. (2023) Intelligent transportation systems in developing countries: Challenges and prospects. *Procedia Computer Science*. 215–222.
17. Elassy, M., Al-Hattab, M., Takruri, M., & Badawi, S. (2024) Intelligent transportation systems for sustainable smart cities. *Transportation Engineering*, 27, 100252.
18. Sheoran, S., Mohanasundaram, S., Kasilingam, R., & Vij, S. (2023) Usability and Accessibility of Open Government Data Portals of Countries Worldwide: An Application of TOPSIS and Entropy Weight Method. *International Journal of Electronic Government Research*, 19(1), 1–25.
19. HERE Technologies. HERE Real-Time Traffic Information. (2023) URL: HERE Real-Time Traffic.
20. Kleinberg, J., & Tardos, É. (2005). *Algorithm design*. Pearson Education.
21. Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2014) *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications* (2nd ed.; MOS-SIAM Series on Optimization, No. 18). Society for Industrial and Applied Mathematics.
22. Ukrainian Logistics Forum. (2024) URL: <https://logistics-ukraine.com> 2024/10/14 > ukrainian-l
23. Vyskub, O. A., & Petrushchenko, D. P. (2024) Technical requirements for the modernization of the Single State Open Data Web Portal (data.gov.ua) [Technical specification, appendix to contract]. International Renaissance Foundation / Fund of Eastern Europe; Ministry of Digital Transformation of Ukraine / State Enterprise “Diia”. Retrieved November 15, 2025, from https://eef.org.ua/wp-content/uploads/2024/12/TV_Modernizatsiya-Veb-portalu-danyh.pdf

References

1. On the principles of state policy on national memory of the Ukrainian people. Law of Ukraine No. 4579-IX of August 21. (2025) Adopted on August 21, 2025.
2. On martial law. Decrees of the President of Ukraine No. 64/2022 of February 24. (2022).
3. State Statistics Service of Ukraine. URL: <http://ukrstat.gov.ua/>
4. Bilous V.M., Hryhoriev O.S. Mathematical modeling of logistics processes in motor transport. *Bulletin of Transport Science*. (2021) No. 2. Pp. 15–27.
5. Vasylytsiv N. Transformation and adaptation of logistics to challenges in conditions of martial law. *Economy and Society*. (2023) No. 55. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-55-78>
6. Venher A., Stepanov O. Intelligent transportation systems in the transport process. *Municipal Economy of Cities: Scientific and Technical Collection. Series: Technical Sciences and Architecture*. (2021) Vol. 1. No. 161. Pp. 212–217.
7. Hrihoriev O.S. Methods for optimizing freight transport routes. *Transport of Ukraine*. (2022) No. 3. Pp. 45–54.
8. European Business Association. Logistics in Ukraine: market and trends 2024 / EBA. Kyiv (2024) 56 p. URL: <https://eba.com.ua/logistics-2024-report>
9. Kozachenko I.M. Digital platforms in freight transportation: problems and prospects. *Logistics and Supply Chain Management*. (2021) Vol. 12, No. 4. Pp. 32–41.
10. Kozachenko I.M., Petrenko S.V. Modern digital solutions in transport flow management. *Logistics and Information Technologies*. (2022) No. 1. pp. 9–19.
11. Kostenko O., Chernenko V., Kulichkov A. Digital transformation of logistics management of freight transportation in Ukraine: institutional challenges and European integration prospects. *Sustainable Economic Development*. (2025) No. 5 (56), pp. 425–431. <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2025-56-58>
12. Current trends in the development of the transport industry. *Logistics of Ukraine*. (2023) URL: <https://logistics-ua.com>
13. Transport platforms in Ukraine: relevance and opportunities / Trans.eu. (2024) URL: <https://www.trans.eu/ua/blog/transportni-platformy-ukrayiny-2024>
14. Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L., & Stein, C. (2022) *Introduction to algorithms* (4th ed.). MIT Press.

15. Dorigo, M., & Stützle, T. (2019) „Ant Colony Optimization: Overview and Recent Advances“. In M. Gendreau & J.-Y. Potvin (Eds.), *Handbook of Metaheuristics* (3rd ed., International Series in Operations Research & Management Science, Vol. 272, pp. 311–351). Springer, Cham.
16. Diderot, C. D., Bernice, N. W. A., Tchappi, I., Mualla, Y., Najjar, A., Galland, S. (2023) Intelligent transportation systems in developing countries: Challenges and prospects. *Procedia Computer Science*. 215–222.
17. Elassy, M., Al-Hattab, M., Takruri, M., & Badawi, S. (2024) Intelligent transportation systems for sustainable smart cities. *Transportation Engineering*, 27, 100252.
18. Sheoran, S., Mohanasundaram, S., Kasilingam, R., & Vij, S. (2023) Usability and Accessibility of Open Government Data Portals of Countries Worldwide: An Application of TOPSIS and Entropy Weight Method. *International Journal of Electronic Government Research*, 19(1), 1–25.
19. HERE Technologies. HERE Real-Time Traffic Information. (2023) URL: HERE Real-Time Traffic.
20. Kleinberg, J., & Tardos, É. (2005) *Algorithm design*. Pearson Education.
21. Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2014) *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications* (2nd ed.; MOS-SIAM Series on Optimization, No. 18). Society for Industrial and Applied Mathematics.
22. Ukrainian Logistics Forum (2024) URL: <https://logistics-ukraine.com> 2024/10/14 › ukrainian-l.
23. Vyskub, O. A., & Petrushchenko, D. P. (2024) Technical requirements for the modernization of the Single State Open Data Web Portal (data.gov.ua) [Technical specification, appendix to contract]. International Renaissance Foundation / Fund of Eastern Europe; Ministry of Digital Transformation of Ukraine / State Enterprise “Diia”. Retrieved November 15, 2025, from https://eef.org.ua/wp-content/uploads/2024/12/TV_Modernizatsiya-Veb-portalu-danyh.pdf.

Дата першого надходження рукопису до видання: 19.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

О. В. ТАЦЕНКО

старший викладач кафедри транспортних технологій
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-1762-8219

О. О. СОЛАРЬОВ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних технологій
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-1485-0685

О. Ю. САВОЙСЬКИЙ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних технологій
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-6459-4931

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКІВ МІЖ ЕРГОНОМІЧНИМ СТАНОМ РОБОЧОГО МІСЦЯ І ЕФЕКТИВНІСТЮ ТРАНСПОРТНОГО ПРОЦЕСУ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАНТАЖІВ

У статті представлено результати експериментально-аналітичного дослідження впливу ергономічного стану робочого місця водія на ефективність транспортного процесу під час експлуатації вантажних автомобілів. Мета роботи полягає у встановленні кількісних закономірностей між ергономічними характеристиками кабіни та такими показниками, як витрата палива, середня швидкість руху, рівень вібрацій та продуктивність водія. Дослідження виконано на вибірці з 20 однотипних автомобілів із проведенням 80 серій вимірювань, для кожного водія визначено інтегральний ергономічний індекс у межах 2–10 балів.

Методика включала вимірювання витрати палива за комбінованим підходом (бортова система та метод «доливання»), аналіз GPS-телематики для визначення швидкості, реєстрацію вібраційного навантаження у точці «водій-сидіння» та статистичну обробку результатів. Установлено, що підвищення ергономічного індексу з 2 до 10 балів супроводжується зменшенням витрати палива з 13,9 до 8,8 л/100 км (–36,7 %), що підтверджується дуже високою зворотною кореляцією. Середня швидкість зростає з 43,0 до 54,6 км/год, що свідчить про підвищення динамічної стабільності керування та зниження психофізіологічних навантажень на водія. Рівень вібрацій у межах 0,50–1,22 м/с² демонструє опосередкований зв'язок, зумовлений зміною режимів руху, тоді як продуктивність формувалася переважно маршрутними умовами.

На основі отриманих даних побудовано регресійні моделі, що дозволяють прогнозувати експлуатаційні показники залежно від ергономічного індексу. Результати підтверджують, що покращення ергономічних параметрів робочого місця водія є дієвим засобом підвищення енергетичної ефективності, стабільності руху та безпеки транспортних операцій.

Ключові слова: ергономіка, робоче місце водія, ефективність перевезень, транспортний процес, людський фактор, працездатність, кореляційний аналіз, регресійний аналіз, безпека руху.

O. V. TATSENKO

Senior Lecturer at the Department of Transport Technologies
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0003-1762-8219

O. O. SOLAROV

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Technologies
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-1485-0685

O. YU. SAVOISKYI

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Transport Technologies
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-6459-4931

RESEARCH ON THE RELATIONSHIP BETWEEN THE ERGONOMIC CONDITION WORKPLACE AND THE EFFICIENCY OF THE CARGO TRANSPORTATION PROCESS

The article presents the results of an experimental and analytical study of how the ergonomic condition of the driver's workplace influences the efficiency of the transport process during the operation of freight vehicles. The aim of the study is to establish quantitative relationships between the ergonomic characteristics of the cabin and key performance indicators such as fuel consumption, average driving speed, vibration level, and driver productivity. The research was conducted on a sample of 20 identical vehicles with 80 measurement cycles, and an integral ergonomic index ranging from 2 to 10 points was determined for each driver.

The methodology included measuring fuel consumption using a combined approach (on-board computer data and the "refill" method), GPS-based analysis of movement speed, registration of vibration loads at the "driver-seat" interface, and statistical data processing. It was found that an increase in the ergonomic index from 2 to 10 points leads to a reduction in fuel consumption from 13.9 to 8.8 L/100 km (–36.7%), which is confirmed by a very strong negative correlation. The average speed increases from 43.0 to 54.6 km/h, indicating improved driving stability and reduced psychophysiological strain on the driver. The vibration level within 0.50–1.22 m/s² shows an indirect relationship caused mainly by changes in speed regimes, while productivity was largely determined by route-specific factors.

Based on the obtained data, regression models were developed to predict operational performance indicators depending on the ergonomic index. The results confirm that improving the ergonomic parameters of the driver's workplace is an effective means of enhancing energy efficiency, driving stability, and the overall safety of transport operations.

Key words: ergonomics, driver's workplace, transportation efficiency, transport process, human factor, driver performance, correlation analysis, regression analysis, road safety.

Постановка проблеми

У сучасних умовах розвитку транспортної галузі ефективність вантажних перевезень являється одним із визначальних чинників конкурентоспроможності підприємств та безпеки транспортних процесів. Поряд із технічним станом автотранспортних засобів та організацією логістичних операцій важливу роль відіграє професійна діяльність водія та продуктивність, яка значною мірою залежить від ергономічного стану його робочого місця.

Робоче місце водія є комплексною системою, що охоплює конструкцію сидіння, розташування органів керування, параметри шуму та вібрації, мікрокліматичні умови й просторову організацію кабіни. Недостатньо оптимізовані ергономічні характеристики можуть спричиняти підвищену стомлюваність, зниження концентрації уваги та уповільнення реакцій водія, що негативно впливає на безпеку руху, швидкість виконання транспортних завдань і паливну економічність.

Наявні наукові дослідження переважно зосереджені на окремих ергономічних параметрах, проте комплексний аналіз їх сукупного впливу на ефективність транспортного процесу залишається недостатньо розробленим. Відсутність системної оцінки взаємозв'язків між характеристиками робочого місця та показниками продуктивності, безпеки й економічності перевезень обмежує можливості оптимізації умов праці водіїв і проектування робочих місць сучасних транспортних засобів.

Зростання вимог до швидкості доставки, безпечності перевезень та раціонального використання ресурсів зумовлює необхідність поглибленого дослідження ролі ергономічних факторів у забезпеченні ефективності транспортного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження і аналіз ергономіки робочого місця водія та її впливу на ефективність транспортного процесу охоплюють широкий спектр наукових підходів. Значна частина фундаментальних робіт з біомеханіки та ергономіки присвячена аналізу фізіологічних навантажень, оптимізації робочих поз і мінімізації ризиків для опорно-рухового апарату водія [1–4]. У цих працях показано, що ергономічно правильна посадка, оптимальні умови сидіння, організація робочого місця та раціональне розміщення органів керування істотно впливають на здоров'я, працездатність та безпеку працівника з мінімізацією негативного впливу на фізичний і психологічний стан працівників.

Дослідженню специфіки умов праці, психофізіологічних та когнітивних аспектів взаємодії людини з транспортною системою та питання зменшення імовірності ризику виникнення професійних захворювань розкрито у працях з інженерної психології та ергономіки [5–7]. Автори підкреслюють важливість управління когнітивним навантаженням, оптимальної структури інформаційних панелей, відповідності сенсорних сигналів та зниження надмірного інформаційного потоку. Показано, що перевантаженість інформацією, недосконала індикація

та незручне розташування приладів можуть збільшувати час реакції водія та підвищувати ймовірність помилок під час виконання технологічних операцій у транспортній галузі.

Практичні методики оцінювання робочих місць та визначення рівня ергономічного ризику активно використовуються у трудовій ергономіці, промисловій безпеці та транспортній галузі [8, 9]. У цих джерелах наведено методи експертної бальної оцінки, аналізу робочих поз, антропометричної відповідності та вимірювання параметрів робочого середовища. Також надано рекомендації щодо проектування робочих місць відповідно до антропометричних та психофізіологічних вимог.

У сфері ергономічного забезпечення транспортних процесів та транспортного менеджменту продемонстровано суттєвий вплив ергономічних факторів на ефективність транспортних процесів і операцій та економічні показники експлуатації транспортних засобів [10–12]. Результати сучасних друкованих праць свідчать, що покращення ергономічних умов сприяє підвищенню продуктивності, зменшенню кількості помилок, зниженню втоми водіїв та оптимізації витрати палива. У роботах встановлено вплив ергономічних аспектів на фахову стійкість працівників транспортної галузі.

У сучасних дослідженнях також проводиться аналіз людського фактору, його складових в процесі управління у транспортних системах та вплив технічних систем на діяльність людей. Основна увага зосереджується на вивченні ролі та взаємозв'язку між людським фактором і ергатичними системами управління [13]. Додатково проводяться дослідження щодо впливу характеристик дорожнього руху і умов роботи на функціональний стан водія [14].

Попри наявні результати, у науковій літературі спостерігається відсутність комплексних досліджень, що безпосередньо аналізують вплив ергономічного стану робочого місця на ефективність перевезення вантажів як процесу. Більшість робіт обмежується оцінкою стану працівників з позицій ергономіки та забезпечення людино-машинної взаємодії в системі «водій – автомобіль – дорога – середовище» [15].

Таким чином, проведений огляд підтверджує наукову та практичну значущість дослідження взаємозв'язку між ергономічним станом робочого місця водія та ефективністю транспортного процесу. Більшість наукових робіт фокусуються на окремих аспектах ергономіки, тоді як комплексний аналіз, що включає одночасно витрату палива, швидкість виконання операцій, рівень вібрацій та інші показники, потребує подальшого розвитку. Це підтверджує актуальність і доцільність проведеного експериментального дослідження. Подальші дослідження мають зосередитися на комплексному аналізі фізичних, психофізіологічних та організаційних факторів у реальних умовах транспортних перевезень.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є аналіз взаємозв'язку між ергономічним станом робочого місця водія та ефективністю вантажних перевезень для визначення факторів, що впливають на продуктивність, безпеку та ефективність.

У межах даного дослідження передбачається:

- визначити вплив ергономічних характеристик робочого місця на швидкість, безпеку та витрати пального під час транспортного процесу;
- дослідити, як стан робочого середовища водія позначається на продуктивності та ризиках виникнення небезпечних ситуацій;
- оцінити роль окремих ергономічних факторів (сидіння, організація простору, мікроклімату, шуму) у формуванні ефективності й безпечності перевезень.

Викладення основного матеріалу дослідження

Методи дослідження. Дослідження проводилося на базі 20 однотипних вантажних автомобілів, що здійснювали регулярні вантажні перевезення у реальних дорожніх умовах. У дослідженні брали участь 20 водіїв, які виконували стандартні транспортні завдання у межах зміни. Метою експерименту було встановлення впливу ергономічного стану робочого місця водія на ключові показники ефективності транспортного процесу. Кожному водію було присвоєно індивідуальний ергономічний індекс, визначений за результатами експертної бальної оцінки робочого місця. Для кожного автомобіля та водія проводилися вимірювання таких параметрів: витрата палива, л/100 км, швидкість виконання транспортного процесу, км/год, рівень вібрацій на робочому місці, м/с² та продуктивність транспортних перевезень, км за зміну. Усі вимірювання здійснювалися в умовах реальної експлуатації, без зміни штатних режимів роботи водіїв.

Витрата палива фіксувалася за допомогою показників штатної бортової системи автомобіля та контрольних замірів за методом «доливання», що забезпечувало уточнення похибки. Показники в даному випадку розраховувалися, як середні значення за одну зміну.

Швидкість виконання транспортного процесу визначалася на основі даних GPS-телематики, маршрутних листів та часу фактичного перебування автомобіля в русі. Даний показник відображав середню швидкість переміщення за зміну. Рівень вібрацій у точці контакту «водій – сидіння» вимірювався за допомогою віброметра, закріпленого на поверхні сидіння. Реєструвалися три складові, як вертикальна вібрація (основна), горизонтальна фронтальна та горизонтальна бокова. Для подальшого аналізу використовувалися інтегральні значення вібрацій.

Ергономічний стан робочого місця оцінювався за 10-бальною шкалою, яка враховувала регулювання та геометрію сидіння, доступність органів керування, оглядовість та розташування приладів, відповідність робочого простору антропометричним параметрам водія та загальний комфорт і стомлюваність. Експертна оцінка здійснювалася групою з трьох фахівців.

Для аналізу отриманих результатів було використано методи порівняння експериментальних даних, статистичний аналіз отриманих показників, визначення кореляційних зв'язків між змінними та регресійний аналіз (лінійна апроксимація залежностей). Дані методи дозволили комплексно оцінити вплив ергономічних факторів на ефективність транспортних операцій.

Результати дослідження. Усі вимірювання охоплювали чотири ключові параметри транспортного процесу, саме витрату палива, швидкість виконання операцій, рівень вібрацій та продуктивність водія за зміну. Також було визначено індивідуальний ергономічний індекс для кожного робочого місця. Експертна оцінка ергономічного стану робочих місць показала значну варіативність між об'єктами. Значення ергономічного індексу змінювалися від 2,0 до 10,0 балів. Це свідчить про те, що в одних автомобілях спостерігалися значні ергономічні недоліки (обмежена регульованість сидіння, незручне компонування органів керування), тоді як інші забезпечували оптимальні умови для роботи водія.

Результати дослідження витрати палива в залежності від ергономічного індексу наведені на рис. 1. Аналіз отриманих результатів показав чітку тенденцію до зменшення зі зростанням ергономічних показників. Показники коливалися в межах 13,9–8,8 л/100 км. Найвищі витрати характерні для окремих транспортних засобів з низьким ергономічним індексом. У таких умовах водії частіше припускаються помилок керування, що підвищує витрати пального через нестабільність маневрування.

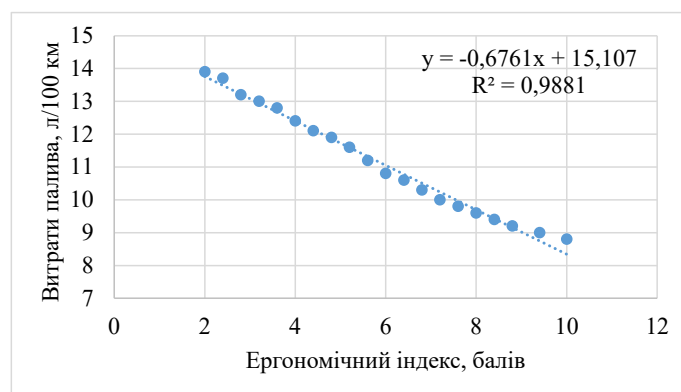


Рис. 1. Залежність витрати палива від ергономічного індексу

Результати дослідження середньої швидкості в залежності від ергономічного індексу наведені на рис. 2.

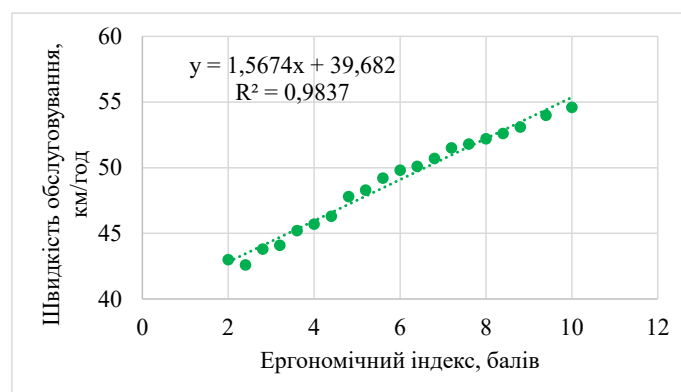


Рис. 2. Залежність швидкості обслуговування від ергономічного індексу

Середня швидкість виконання транспортних операцій становила 43,0–54,6 км/год (рис. 2). Зростання цього показника спостерігалося одночасно зі збільшенням ергономічного індексу, що вказує на покращення роботи водія при оптимізації робочого місця. Водії, які мали кращі умови оглядовості та зручне розташування органів керування, що демонструвало вищу стабільність руху.

Рівень вібрацій (рис. 3), виміряний у точці контакту водія та сидіння, становив 0,50–1,22 м/с². Хоча вібрації зростали разом зі швидкістю руху, більшість значень залишалися в межах нормативних вимог. Жодних екстремальних перевантажень виявлено не було.

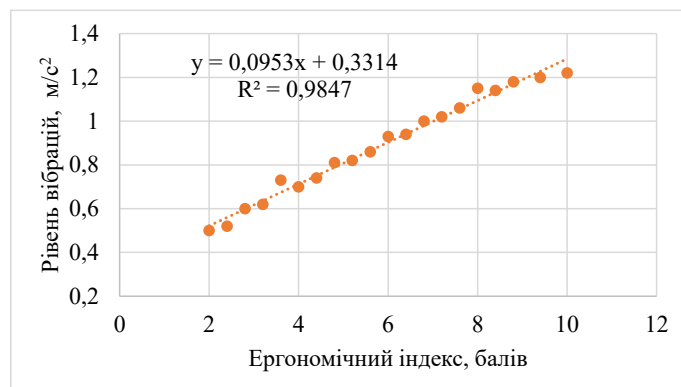


Рис. 3. Залежність рівня вібрації від ергономічного індексу

Результати дослідження продуктивності в залежності від ергономічного індексу наведені на рис. 4.

Продуктивність вимірювалася у кілометрах, пройдених за зміну, і становила 77–101 км. Цей показник виявився менш пов'язаним із ергономічними характеристиками та більше залежав від функціональних особливостей маршруту (підйоми, навантаженість руху, час завантаження/розвантаження і т.п.).

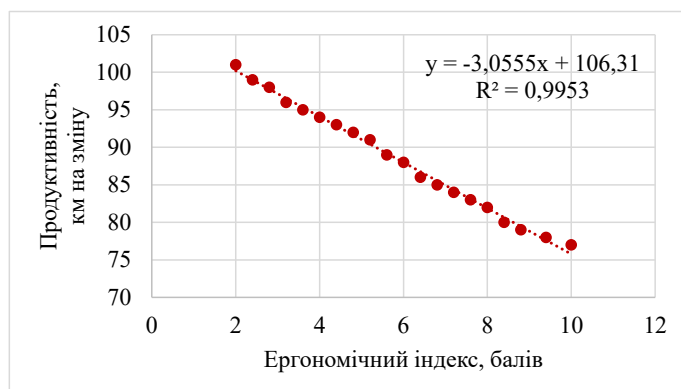


Рис. 4. Залежність продуктивності від ергономічного індексу

Аналіз результатів. Отримані експериментальні дані дозволяють простежити виражені закономірності впливу ергономічного стану робочого місця водія на ефективність транспортного процесу. Для поглибленого аналізу розглянуто взаємозв'язки між ергономічним індексом та чотирма основними експлуатаційними параметрами: витратою палива, швидкістю обслуговування, рівнем вібрацій та продуктивністю водія за зміну.

Результати впливу ергономіки на витрату палива показали наявність стійкої зворотної залежності між ергономічним індексом та витратою палива. При низьких значеннях ергономічного індексу 2,0–3,0 бали витрата становила 13,0–13,9 л/100 км, тоді як за високих значень 8,0–10,0 балів вона знижувалася до 8,8–9,6 л/100 км. Це підтверджує, що комфортна посадка забезпечує стабільнішу траєкторію руху і при цьому водій менше робить корекцій керма. Також знижується частота різких прискорень і гальмувань. Усе це сприяє економії палива.

Між ергономічним індексом і швидкістю обслуговування виявлено пряму залежність. При збільшенні індексу швидкість поступово зростала від 43,0 до 54,6 км/год. Ця закономірність пояснюється тим, що покращена оглядовість зменшує кількість ситуацій, які вимагають зниження швидкості. Також водій менше втомлюється та довше зберігає високу продуктивність. А оптимальна організація доступу до органів керування підвищує точність маневрування. Таким чином, ергономічно оптимізовані робочі місця дають змогу виконувати транспортні завдання швидше та ефективніше.

Під час проведення досліджень рівень вібрацій збільшувався зі зростанням швидкості руху, але варіював у безпечних межах 0,50–1,22 м/с². За результатами аналізу встановлено, що підвищення ергономічного індексу супроводжується лише незначною тенденцією до зменшення інтегрального рівня вібрацій у точці контакту

«водій – сидіння». Вібраційні показники були більшою мірою пов'язані з дорожніми умовами та швидкістю руху, ніж із ергономічним станом кабіни. Отже, вібраційне навантаження не нівелює позитивного впливу ергономічних факторів і має переважно фоновий характер щодо ефективності транспортного процесу.

Продуктивність змінювалася в межах 77–101 км/зміна. Виявлено слабку пряму залежність між ергономічним індексом та продуктивністю водія: за вищих значень індексу спостерігається тенденція до збільшення добового пробігу. Водночас сила цього зв'язку суттєво нижча, ніж для витрати палива чи швидкості обслуговування. У більшості випадків продуктивність визначається маршрутними умовами (інтенсивність руху, кількість зупинок, конфігурація маршруту, час завантаження/розвантаження, тип вантажу тощо). Таким чином, ергономіка впливає на продуктивність опосередковано – через зниження втоми та підвищення якості керування автомобілем.

Проведено кореляційний та регресійний аналізи між ергономічним індексом робочого місця водія та основними експлуатаційними показниками транспортного процесу.

Результати кореляційного аналізу представлено в таблиці 1. Отримані значення коефіцієнтів кореляції демонструють надзвичайно високий ступінь статистичного зв'язку між ергономічним індексом робочого місця водія та основними експлуатаційними параметрами транспортного процесу.

Таблиця 1

Результати кореляційного аналізу між ергономічним індексом робочого місця водія та основними експлуатаційними показниками

№ п/п	Модель показників	Коефіцієнт кореляції, r	Характер кореляційного зв'язку показників та інтерпретація
1.	Ергономічний індекс – витрата палива	-0.994	Спостерігається майже функціональна зворотна залежність. Це означає, що покращення ергономічних характеристик кабіни систематично супроводжується зменшенням паливних витрат. Така закономірність відображає фундаментальний вплив ергономіки на точність керування, плавність маневрування та характер використання акселератора й гальм, що безпосередньо формує енергетичну ефективність транспортного засобу.
2	Ергономічний індекс – швидкість	+0.992	Зафіксована дуже сильна пряма кореляція, що вказує на системне підвищення середньої швидкості руху із зростанням ергономічного індексу. Це підтверджує, що ергономічно оптимізоване робоче місце сприяє підвищенню ситуаційної поінформованості водія, покращує динаміку прийняття рішень і зменшує психофізичні витрати при керуванні.
3	Ергономічний індекс – рівень вібрацій	+0.992	Незважаючи на високий коефіцієнт кореляції, цей зв'язок слід трактувати як похідний (непрямий). Зростання вібраційного показника зумовлене не ергономічним індексом, а супутнім збільшенням середньої швидкості руху. Це типово явище, описане у стандартах ISO 2631, де вібраційне навантаження зростає пропорційно швидкості переміщення транспортного засобу. Таким чином, цей зв'язок є кореляційним, але не каузальним.
4	Ергономічний індекс – продуктивність	-0.998	Виявлена практично функціональна зворотна залежність не свідчить про негативний вплив ергономіки. Навпаки: різниця у продуктивності пояснюється маршрутною структурою, де автомобілі з вищими ергономічними оцінками залучалися до виконання коротших завдань. Тому коефіцієнт кореляції відображає системний логістичний ефект, а не властивості ергономічного фактору.

Результати регресійного аналізу представлено в таблиці 2. Проведені лінійні регресійні моделі демонструють високі коефіцієнти детермінації, що свідчить про стійкість тенденцій і про те, що ергономічний індекс є формально надійним предиктором зміни досліджуваних експлуатаційних показників.

Отримані рівняння дозволяють прогнозувати витрату палива при зміні параметрів робочого місця, оцінювати вплив ергономічних рішень на швидкість роботи водія, виконувати порівняння між різними конфігураціями кабін та обґрунтовувати капітальні вкладення в ергономічну модернізацію транспортних засобів. Показано, що найбільш відчутний ефект ергономічного покращення проявляється в зниженні витрати палива та підвищенні середньої швидкості обслуговування, тоді як вплив на рівень вібрацій та продуктивність має другорядний, опосередкований характер.

Висновки

1. Покращення ергономічних характеристик робочого місця водія забезпечує кількісне підвищення ефективності транспортного процесу, зокрема, швидкість зростає з 43,0 до 54,6 км/год, а витрата палива зменшується з 13,9 до 8,8 л/100 км. Кожен додатковий бал ергономічного індексу дає економію близько 0,68 л/100 км, що свідчить про стабілізацію керування та підвищення безпеки.

2. Стан робочого середовища впливає на працездатність водія та якість виконання рейсу. Продуктивність змінювалася в діапазоні 77–101 км/зміну, причому її варіація зумовлена переважно маршрутними умовами, а не ергономікою. Водночас підвищення ергономічного індексу супроводжується зменшенням втоми, стабільнішим стилем керування та нижчими ризиками помилок, що підтверджується контрольованими значеннями вібрацій 0,50–1,22 м/с².

Таблиця 2

**Результати регресійного аналізу між ергономічним індексом робочого місця водія
та основними експлуатаційними показниками**

№ п/п	Модель показників	Рівняння регресії	Показники рівняння	Інтерпретація
1.	Ергономічний індекс – витрата палива	$y = -0,676x + 15,1$	x – ергономічний індекс (2...10 балів) y – витрата палива, л/100 км.	Отримане рівняння демонструє, що кожен додатковий бал ергономічного індексу приводить до зниження витрати палива в середньому на 0,68 л/100 км. Це високий ефект, який повністю узгоджується з теорією ергономіки транспортних систем і поведінковими моделями водія. Показник детермінації ($R^2 = 0,99$) свідчить про майже повне статистичне пояснення варіації витрат ергономічними факторами.
2	Ергономічний індекс – швидкість	$v = 1,57x + 39,7$	x – ергономічний індекс v – середня швидкість, км/год.	Модель демонструє стабільне зростання швидкості на приблизно 1,6 км/год на кожен бал індексу. Отриманий результат свідчить про суттєвий вплив ергономічних умов на кінетичні характеристики транспортного процесу. Високий R^2 підтверджує, що зміни швидкості мають системний характер і не є випадковими.
3	Ергономічний індекс – рівень вібрацій	$a = 0,095x + 0,331$	x – ергономічний індекс a – вібрації, м/с ² .	Формальний прямий зв'язок між індексом та вібраціями є результатом супутнього збільшення середньої швидкості, а не властивістю ергономічної системи. Це характерна ситуація регресійного перекриття. Отже, модель має статистичний, але не фізичний зміст: підвищення вібрацій є наслідком зміни режимів руху, а не ергономічних параметрів.
4	Ергономічний індекс – продуктивність	$p = -3,06x + 106,3$	x – ергономічний індекс p – продуктивність, км.	Модель показує зменшення продуктивності приблизно на 3 км/зміну на кожен бал. Це не вказує на погіршення ефективності праці водія, а відображає структурний поділ маршрутів: транспортні засоби з високим ергономічним індексом працювали на коротких рейсах. Таким чином, регресійне рівняння відображає операційно-логістичну особливість вибірки, а не функціональний вплив ергономічних факторів.

3. Окремі ергономічні фактори, такі як конструкція та регулювання сидіння, компонування простору, мікроклімат і шум, кількісно впливають на результативність перевезень. Різниця ергономічного індексу у 8 балів призвела до зменшення витрати пального на 36,7%, зростання швидкості на 11,6 км/год та більш рівномірного розподілу вібраційних навантажень. Це підтверджує ключову роль ергономічних умов у підвищенні ефективності й безпечності роботи водія.

Список використаної літератури

- Гюлев Н. У. Особливості ергономіки та психофізіології в діяльності водія: навч. посіб. Харків: ХНАМГ, 2012. 185 с.
- Основи ергономіки: навч. посіб. / В. Г. Брусенцов та ін. Харків: УкрДАЗТ, 2011. 141 с.
- Шевяков О. В. Ергономіка в системі психології праці: навч. посіб. Дніпропетровськ: ДГУ, 2007. 157 с.
- Al Madani D., Dababneh A. Rapid Entire Body Assessment: A Literature Review. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. Vol. 9, no. 1. P. 107–118. DOI: 10.3844/ajeassp.2016.107.118.
- Subramanian S., Raju N., Srinivasan P., Jegannathan K., Jayaraman S. Low back pain assessment using surface electromyography among industry workers during the repetitive bending tasks. *International Journal of Human Factors and Ergonomics*. 2018. Vol. 5, no. 4. P. 277–292. DOI: 10.1504/IJHFE.2018.096112.
- Системологія на транспорті. Ергономіка: у 5 кн. / за ред. М. Ф. Дмитриченко. Київ: Знання України, 2008. Кн. 5. 256 с.
- Системологія на транспорті. Організація дорожнього руху: у 5 кн. / за ред. М. Ф. Дмитриченко. Київ: Знання України, 2007. Кн. 4. 452 с.
- Gao Y., Rasouli S., Timmermans H., Wang Y. Trip stage satisfaction of public transport users: A reference-based model incorporating trip attributes, perceived service quality, psychological disposition and difference tolerance. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2018. Vol. 118. P. 759–775.
- Krystopchuk M. Ye. Change of drivers functional condition while moving along highways of different technical categories. *Transport Technologies*. 2020. – Vol. 1, no. 1. P. 22–32. DOI: 10.23939/tt2020.01.022.
- Давідіч Ю.О., Куш Є.І., Понкратов Д.П. Ергономічне забезпечення транспортних процесів: навч. посіб. Харків: ХНАМГ, 2011. 392 с.
- Кожушко А. П., Калінін Є. І. Ергономічні властивості та екологія транспортних засобів: навч. посіб. Харків: НТУ «ХПІ», 2022. 352 с.

12. Петренко О. І. Принципи ергономічної організації технологічних процесів перевезення на транспорті. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33(72), № 6. С. 253–258. DOI: 10.32782/2663-5941/2022.6/41.
13. Мельник О. М. Дослідження впливу фактору людини на ергатичні системи управління на транспорті. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2023. Вип. 25. С. 10–15. DOI: 10.15802/tstt2023/284487.
14. Лобашов О. О., Прасоленко О. В. Вплив характеристик дорожнього руху на функціональний стан водія. *Комунальне господарство міст*. 2018. Вип. 7. С. 40–45. DOI: 10.33042/2522-1809-2018-7-146-40-45.
15. Тараненко М. Є., Мигаль Г. В., Кобріна Н. В., Маковецький А. В. Проблема комплексного забезпечення якості та безпеки функціонування транспортних засобів. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2022. Вип. 21. С. 253–258. DOI: 10.30977/VEIT.2022.21.0.05.

References

1. Huliiev, N. U. (2012). Osoblyvosti erhonomiky ta psykhofiziologii v diialnosti vodiia [Features of ergonomics and psychophysiology in driver activity]. Kharkiv: KhNAMG.
2. Brusentsov, V. H., et al. (2011). Osnovy erhonomiky [Fundamentals of ergonomics]. Kharkiv: UkrDAZT.
3. Sheviakov, O. V. (2007). Erhonomika v systemi psykhologii pratsi [Ergonomics in the system of labor psychology]. Dnipropetrovsk: DDU.
4. Al Madani, D., & Dababneh, A. (2016). Rapid Entire Body Assessment: A Literature Review. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9(1), 107–118. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2016.107.118>.
5. Subramanian, S., Raju, N., Srinivasan, P., Jeganathan, K., & Jayaraman, S. (2018). Low back pain assessment using surface electromyography among industry workers during the repetitive bending tasks. *International Journal of Human Factors and Ergonomics*, 5(4), 277–292. <https://doi.org/10.1504/IJHFE.2018.096112>
6. Dmytrychenko, M. F. (Ed.). (2008). Systemolohiia na transporti. Erhonomika [Systemology in transport. Ergonomics] (Vol. 5). Kyiv: Znannia Ukrainy.
7. Dmytrychenko, M. F. (Ed.). (2007). Systemolohiia na transporti. Orhanizatsiia dorozhnoho rukhu [Systemology in transport. Traffic organization] (Vol. 4). Kyiv: Znannia Ukrainy.
8. Gao, Y., Rasouli, S., Timmermans, H., & Wang, Y. (2018). Trip stage satisfaction of public transport users: A reference-based model incorporating trip attributes, perceived service quality, psychological disposition and difference tolerance. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 118, 759–775.
9. Krystopchuk, M. Ye. (2020). Change of drivers' functional condition while moving along highways of different technical categories. *Transport Technologies*, 1(1), 22–32. <https://doi.org/10.23939/tt2020.01.022>.
10. Davidich, Yu. O., Kush, Ye. I., & Ponkratov, D. P. (2011). Erhonomichne zabezpechennia transportnykh protsesiv [Ergonomic support of transport processes]. Kharkiv: KhNAMG.
11. Kozhushko, A. P., & Kalinin, Ye. I. (2022). Erhonomichni vlastyvoli ta ekolohiia transportnykh zasobiv [Ergonomic properties and ecology of vehicles]. Kharkiv: NTU “KhPI”.
12. Petrenko, O. I. (2022). Principles of ergonomic organization of technological processes of transportation. *Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. Technical Sciences Series*, 33(72)(6), 253–258. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/41>.
13. Melnyk, O. M. (2023). Research of the influence of the human factor on ergatic control systems in transport. *Transport Systems and Technologies of Transportation*, 25, 10–15. <https://doi.org/10.15802/tstt2023/284487>.
14. Lobashov, O. O., & Prasolenko, O. V. (2018). Influence of traffic characteristics on the functional state of the driver. *Municipal Economy of Cities*, 7, 40–45. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2018-7-146-40-45>.
15. Taranenko, M. Ye., Myhal, H. V., Kobrina, N. V., & Makovetskyi, A. V. (2022). The problem of comprehensive provision of quality and safety of vehicle functioning. *Automobile and Electronics. Modern Technologies*, 21, 253–258. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.21.0.05>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

Д. Б. ШАХНІН

кандидат хімічних наук,
начальник лабораторії фармацевтичних розробок
ПрАТ «Завод по виробництву інсулінів «Індар»
ORCID: 0000-0001-9657-8621

І. М. ВОЛОШИНА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри біотехнології, шкіри та хутра
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0003-1943-8048

Л. А. МАЙСТРЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри біотехнології, шкіри та хутра
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0002-1643-305X

І. О. ГРЕЦЬКИЙ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри біотехнології, шкіри та хутра
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0003-1943-8048

БІОІНЖИНІРІНГ РЕКОМБІНАНТНИХ БІЛКІВ

Робота присвячена обґрунтуванню особливостей технологічних схем, процесів та факторів впливу у виробництві рекомбінантних білків. Зазначено, що сучасні технології рекомбінантних ДНК передбачають отримання моноклональних антитіл та деяких основ лікарських речовин відповідно до біореакцій із використанням клітин ссавців, дріжджів або бактерій. Відповідно до рекомбінантної технології потрібний ген виділяють з одного організму і вставляють у невеликий фрагмент ДНК-носія, який є вектором. Зазначено, що ефективною умовою для розмноження рекомбінованої ДНК є наявність подібної або неспорідненої клітини господаря/реципієнта. Враховуючи, що в результаті біопроцесу, рекомбінантний білок, який експресується, знаходиться в біомасі в низькій концентрації і є дуже розведеним. Розділення систем біомаси є важливою складовою в біотехнології рекомбінантних білків. Розділення можна досягти за допомогою фільтрації, седиментації, сепарації, центрифугуванням. В роботі представлено узагальнену схему біопроцесінгу. Обґрунтовано технологічну специфіку процесів та обладнання у виробництві рекомбінантних білків та визначено фактори забезпечення ефективного біопроцесінгу. Доведено, що важливими етапами концентрування білка є фільтрація, сепарація, центрифугування з подальшою ультрафільтрацією або діафільтрацією для отримання концентрованого розчину білка у буферному розчині. Очищення концентрованого білка здійснюється методом іонообмінної або афінної хроматографії. Остаточна стерильна фільтрація з використанням мікрофільтра забезпечує отримання кінцевого продукту рекомбінантного білка. В статті встановлено та обґрунтовано роль факторів продуктивності етапів розділення та концентрування білка, що включає вихід за білком, ступінь відділення твердої фази, продуктивність центрифуги та життєздатність клітин.

Ключові слова: рекомбінантний білок, біомаса, біотехнологія, біоінжиніринг, технологічна схема, розділення, концентрування, очищення, показники виходу продукту.

D. B. SHAKHNIN

Candidate of Chemical Sciences,
Head of Pharmaceutical Development Laboratory
PrJSC "Insulin Production Plant "Indar"
ORCID: 0000-0001-9657-8621

I. M. VOLOSHYNA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Biotechnology, Leather and Fur
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0003-1943-8048

L. A. MAISTRENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Biotechnology, Leather and Fur
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0002-1643-305X

I. O. HRETSKYI

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Biotechnology, Leather and Fur
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0003-1943-8048

BIOENGINEERING OF RECOMBINANT PROTEINS

The work is devoted to substantiating the peculiarities of technological schemes, processes, and influencing factors in the production of recombinant proteins. It is noted that modern recombinant DNA technologies involve the production of monoclonal antibodies and certain basic medicinal substances through bioreactions using mammalian cells, yeast, or bacteria. According to recombinant technology, the required gene is isolated from one organism and inserted into a small fragment of DNA, which serves as a carrier, known as a vector. It is noted that an effective condition for the reproduction of recombinant DNA is the presence of a similar or unrelated host/recipient cell. Considering that, as a result of the bioprocess, the recombinant protein expressed is found in the biomass at low concentrations and is highly diluted, the separation of biomass systems is a crucial component in recombinant protein biotechnology. Separation can be achieved through filtration, sedimentation, separation, centrifugation, and other methods. The paper presents a generalised scheme for processing recombinant proteins. The technological specificity of the processes and equipment in the production of recombinant protein is substantiated—separation, centrifugation, etc. The paper presents a generalised scheme for processing recombinant proteins. The technological specifics of the processes and equipment used in the production of recombinant proteins are substantiated, and the factors that ensure effective bioprocessing in this process are identified. It has been proven that the critical stages of protein concentration are filtration, separation, centrifugation, followed by ultrafiltration and diafiltration to obtain a concentrated protein solution in a buffer solution. Purification of the concentrated protein is performed using ion-exchange or affinity chromatography. Final sterile filtration using microfiltration ensures the final product is a recombinant protein. The article establishes and substantiates the role of productivity factors in the stages of separation and concentration of primary protein, including protein yield, degree of solid phase separation, and centrifuge productivity.

Key words: recombinant protein, biomass, biotechnology, bioengineering, technological scheme, separation, concentration, purification, product yield indicators.

Постановка проблеми

Одним з найпоширеніших методів у біотехнології є технології рекомбінантної ДНК [1, 2]. Відповідно до зазначених технологій потрібний ген виділяють з одного організму і вставляють у невеликий фрагмент ДНК-носія, який є вектором. При цьому важливо, щоб рекомбінована ДНК (вектор+ген) могла розмножуватися в подібній або неспорідненій клітині господаря/реципієнта.

Технології рекомбінантних ДНК стали дуже популярними для створення білків, що мають певні конформації та функції [1, 3] і які в біофармацевтиці – терапевтичні білки. Існують дві ключові перешкоди для отримання терапевтичного білка [4] – це відновлення невеликої концентрації білка з біомаси після ферментації шляхом розділення та забезпечення високої чистоти білкового продукту за допомогою очищення. В зв'язку з цим основні завдання технологій рекомбінантної ДНК обумовлені тим, що білок, який експресується в результаті біопроцесу, знаходиться в дуже розведеному стані, тобто в низькій концентрації. Для виділення необхідного продукту важливою складовою біотехнологічного виробництва є біоінжиніринг, що полягає у ціленаправленому та оптимізованому виконанні ряду технологічних процесів, серед яких важливе місце займають фільтрування, центрифугування, відмінка тощо, що і обумовило актуальність даного дослідження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сучасні технології рекомбінантних ДНК передбачають отримання моноклональних антитіл та деяких основ лікарських речовин відповідно до біореакцій із використанням клітин ссавців, дріжджів або бактерій.

Клітини ссавців, такі як клітини яєчника китайського хом'яка (СНО), є популярними клітинами-хазяїнами [4, 5]. Характерний розмір клітини ссавців становить близько 10-20 мікрон. На відміну від рослинної клітини, клітини тварин і ссавців не мають клітинної стінки, тому вони покладаються на плазматичну мембрану, щоб зберегти внутрішньоклітинний вміст недоторканим. Висока напруга зсуву, що діє на клітину, може розірвати крихку мембрану, вивільнивши внутрішньоклітинний матеріал. Дріжджі також широко використовуються як клітини-господарі в технологіях рекомбінантних ДНК, знання та досвід щодо яких ми отримали у пивоварній промисловості [6, 7]. На відміну від клітини ссавців, клітина дріжджів має міцну клітинну стінку. Дріжджові клітини менші за клітини ссавців і зазвичай мають розмір від 7 до 10 мікрон. Бактерії, такі як *Escherichia coli* (далі – *E. coli*) і *Bacillus subtilis* використовуються як клітини-господарі для техніки рекомбінантної ДНК [8, 9]. *E. coli* має міцну клітинну стінку з зовнішньою і внутрішньою мембраною. Зазвичай кишкова паличка має видовжену форму з розмірами 3-5 мкм в довжину і 1 мкм в ширину. Терапевтичний білок може «експресуватися» цими клітинами-хазяїнами або організмами за допомогою рекомбінантної ДНК. Білок, що цікавить, може залишатися в клітині (внутрішньоклітинний) або секретуватися назовні клітини (позаклітинний). Вищезгаданий біосинтез забезпечує більшу інженерну гнучкість, специфічність, універсальність, надійність і економічну ефективність.

Розділення систем біомаси є важливою складовою [10] в біотехнології рекомбінантних білків. Зазначене на практиці є складним завданням через низьку концентрацію присутнього білка і великий об'єм рідини, крихкість клітин, наявність клітинних залишків, дрібних частинок і колоїдів, а також високу в'язкість через розчинення внутрішньоклітинних речовин, таких як РНК. Як правило, розділення можна досягти за допомогою фільтрації та седиментації. Існують певні специфічні проблеми, пов'язані з кожним з цих методів, що будуть охарактеризовані в цьому дослідженні. В зв'язку з цим, в статті буде окреслено ключові моменти щодо забезпечення ефективних технологій рекомбінантного білку.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є: дослідження особливостей технологічних схем, процесів та факторів впливу у виробництві рекомбінантних білків.

Об'єктом дослідження є технологічні схеми та специфіка технологічного обладнання у виробництві рекомбінантних білків.

Предмет дослідження – особливості забезпечення ефективного біопроцесингу у виробництві рекомбінантних білків.

Для дослідження використано загальнонаукові та спеціальні методи аналізу, системного підходу, наукового узагальнення та порівняння даних наукових джерел (публікації вітчизняних та закордонних науковців).

Викладення основного матеріалу дослідження

Різні рекомбінантні білки зазвичай експресуються генно-інженерною культурою, такою як дріжджі, бактерії (наприклад, *E. coli*) і живі клітини (наприклад, клітини ссавців і рослин). При цьому позаклітинний (зовнішньоклітинний) білок, що експресується дріжджами та клітинами ссавців, знаходиться в рідкій фазі, тоді як білок, що експресується генно-інженерними штамами бактерій, знаходиться всередині бактеріальних клітин, які згодом потребують лізису для вивільнення білка. Процесинг клітинної культури здійснюється в певному діапазоні температури, тиску та інтенсивності перемішування, при цьому ферментація (культивування бактерій) зазвичай відбувається протягом коротшого часу та в більш інтенсивних умовах (вища температура процесу, тиск, і інтенсивніше перемішування), тоді як біореакція (культивування клітин дріжджів, рослин або ссавців) відбувається протягом тривалішого часу та за м'якших умов (нижча температура процесу, тиск, і лише помірне перемішування).

На рис 1. представлено узагальнену схему процесингу рекомбінантного білка, в якому білок експресується позаклітинно, а цільовим продуктом є рідина.

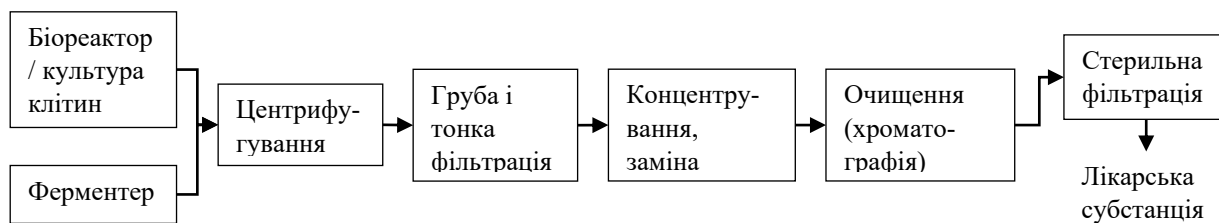


Рис. 1. Загальна технологічна схема рекомбінантного білка

Безпосередній перший етап – етап розділення – також називають первинним виділенням білка. Після сепарації твердої та рідкої фази за допомогою будь-якого з вищезазначених можливих методів, буферний розчин з білком можна замінити або розбавити більш відповідним буфером з іншим рН та іонною силою з подальшим концентруванням за допомогою комбінації ультрафільтрації та діалізації. Кінцевим продуктом є концентрований

розчин білка у відповідному буферному розчині. На цій стадії, білок можна очистити за допомогою іонообмінної або афінної хроматографії для видалення будь-яких домішок і забруднень. Остаточна стерильна фільтрація передбачає використання мікрофільтра з розміром 0,2 мікрона для видалення бактерій, які могли з'явитися під час обробки. Кінцевий продукт зазвичай є лікарською субстанцією.

Окрім первинного виділення в подальшому процесінгу рекомбінантного білка, відцентрова сепарація також використовується в багатьох біотехнологічних процесах розділення твердої та рідкої фаз у виробництві ліків, зокрема гормонів (таких як інсулін) та багатьох інших. У процесі виробництва, препарати (у твердому вигляді) часто містять солі та інші домішки. У таких випадках, субстанції необхідно промивати шляхом ресуспендування з подальшим відцентровим відділенням. Крім того, кристалізація та осадження на стадії очищення вимагають розділення твердої та рідкої фаз центрифугуванням. Завданнями цих процесів є повне зв'язування або виділення цінних суспендованих твердих речовин, на відміну від виділення розчинного білка, що експресується в культуральне середовище дріжджами та клітинами ссавців, де цільовим продуктом є рідка фаза. Інша не менш важлива задача полягає в тому, щоб зменшити рівень вмісту домішок в кристалах до прийнятного рівня для наступного виготовлення фармацевтичної композиції, наприклад промиванням з подальшим відцентровим відділенням.

Після центрифугування центрат (супернатант або верхній потік), що містить невелику кількість зважених твердих речовин, залишає центрифугу разом із вологим концентратом (вологим кеком або нижнім потоком), як це зображено на рис. 2. Можуть вводитись також інші речовини, зокрема хімічні речовини (коагулянти та флокулянти), додані для флокуляції вхідної суспензії (не показано на рис. 2). Як відомо, цільовий білковий продукт може бути у дрібнодисперсних суспендованих твердих компонентах (таких як тількия включення, кристали або осад, що містять білок), або в рідкій фазі центрату, як у випадку позаклітинної експресії білка (в клітинах дріжджів і ссавців).

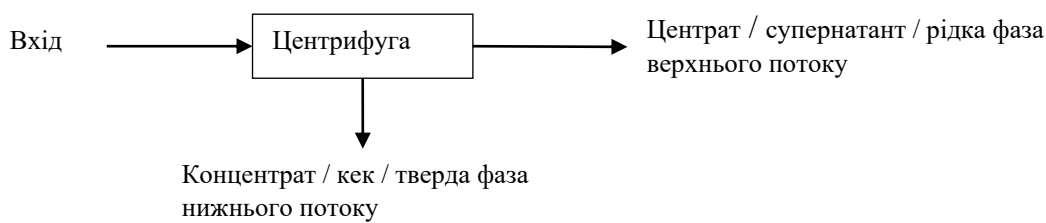


Рис. 2. Типові вхідні та вихідні потоки центрифугування

Центрифугу потрібно налаштувати таким чином, щоб відокремити продукт від решти (відходів або потоку для повторного використання). Залежно від конкретного процесу, для оцінки відцентрового розділення зазвичай використовуються деякі якісні або кількісні показники. Існує кілька загальних показників продуктивності центрифуги – вихід за білком, вміст суспендованих твердих речовин у центраті або ступінь відділення твердої фази, продуктивність або потужність центрифуги, а також життєздатність клітин.

Вихід за білком. Для розчинного білка, експресованого позаклітинно, одним з важливих показників ефективності розділення центрифуги є вихід за білком, який визначається як відношення кількості (наприклад, кг/хв або г/хв) білку, виділеного в рідкому продукті, до кількості (кг/хв або г/хв) білку у вхідному потоці в центрифугу. Повне виділення білка без втрат дасть 100%. Зазвичай має бути дуже високим, перш ніж процес виділення можна вважати придатним. Вихід 90% або вище не є нетиповим. Конкретна величина виходу залежить від того, наскільки складним є сепарування.

Для розрахунку виходу для центрифуги з безперервною подачею, необхідно виміряти об'ємну швидкість (л/м) і концентрацію протеїну як у вхідному потоці, так і у центраті, відповідно. Для розрахунку виходу для центрифуги з періодичною подачею, об'єм і концентрацію білка слід виміряти як на вході, так і у супернатанті (тобто у центраті), відповідно. Очевидно, що втрати рідини в концентраті або кеці впливає на вихід, оскільки білок розчинений в рідині, тому кількість рідини в концентраті має бути мінімізована.

Вміст суспендованої твердої фази в центраті. Слід звести до мінімуму концентрацію суспендованих твердих речовин у центраті, якщо тільки не проводиться класифікація, коли дрібніші тверді частки в центраті відокремлюються від більших твердих частинок у концентраті, як робиться для відділення клітинного дебрису від тілець включення. Мірою прозорості рідкого центрату є кількість суспендованих твердих речовин за вагою або за об'ємом після того, як цей центрат обертався в трубчастій центрифугі протягом заданого часу. Для клітинної культури, лише дрібні тверді частки в субмікронному діапазоні вивільняються з центратом або супернатантом, щоб бути остаточно затриманими наступним фільтром. Непрямим методом оцінки вмісту суспендованої твердої фази у центраті є вимірювання оптичної непрозорості (або каламутності) центрату. Вимірювання каламутності слід часто калібрувати за стандартом. Наслідком хорошого освітлення є те, що відношення кількості твердої фази,

отриманої шляхом седиментації (кг/год; суха основа), до вхідної кількості твердої фази (кг/год; суха основа), має бути дуже високим. Цей коефіцієнт називається виділенням твердої фази R_s . Якщо R_s дорівнює 100%, це означає ідеальне розділення та відсутність твердої фази у центраті / супернатанті від отримання продукту. Для клітинної культури, ми можемо досягти, скажімо, 99,9% виділення клітин шляхом центрифугування, залишаючи мінімальну кількість клітин, що потрапили у центрат / супернатант.

Продуктивність центрифуги. Об'ємна швидкість або продуктивність центрифуги в л/хв є важливою мірою об'ємної пропускної здатності по рідині, яку може досягти центрифуга. Після встановлення загальної потужності (розміру та кількості) ферментерів / біореакторів, визначається необхідна швидкість відцентрової сепарації, що, у свою чергу, визначає загальну потужність (розмір та кількість) центрифуг. Високошвидкісні центрифуги більшого об'єму знадобляться у меншій кількості порівняно з низькошвидкісними центрифугами меншого об'єму. З іншого боку, необхідно запланувати резервну потужність відцентрової сепарації на заміну робочих центрифуг, якщо одна з них потребуватиме технічного обслуговування. Таким чином, для планування роботи конче необхідна інформація про продуктивність центрифуг.

Життєздатність клітин. Клітини ссавців набувають популярності в експресії білка, оскільки існує більша гнучкість у цьому шляху. Однак, на відміну від клітин рослин або дріжджів, клітини ссавців дуже чутливі до тангенціальної напруги, оскільки вони не мають клітинної стінки. Вони дуже чутливі до тангенціальної напруги, наприклад під час прискорення вхідного потоку. Клітини можуть бути знищені під час цього, вивільняючи внутрішньоклітинну білкову речовину, яка може бути шкідливою для подальшого очищення (перехресне забруднення цільового білка), і більш дрібне сміття, що ускладнює проблему розділення і призводить до збільшення вмісту суспендованих твердих частинок, які завантажують глибинний фільтр. Як мінімум, під час розділення за допомогою виробничих центрифуг, життєздатність клітин клітинних ліній ссавців повинна підтримуватися на найвищому досяжному рівні.

Незважаючи на широкий вибір модельних об'єктів для рекомбінантних технологій бактерія *Escherichia coli* займає провідну позицію як модельний організм. Завдяки своїм унікальним властивостям: легкість генетичних маніпуляцій, здатність до високої продуктивності та широкого спектра застосування – цей мікроорганізм залишається найпопулярнішим для виробництва рекомбінантних білків. Дослідження в галузі метаболічної інженерії та синтетичної біології дозволили покращити характеристики *E. coli* для ефективного виробництва біомаси та білків, а також для розробки нових терапевтичних і промислових застосувань. Незважаючи на деякі обмеження, пов'язані з білковою експресією та глікозилюванням, інженерні підходи та оптимізація умов культивування допомагають подолати ці виклики.

Висновки

В роботі досліджено характерну специфіку та особливості технологічних схем, процесів та факторів впливу у виробництві рекомбінантних білків. Показано, що рекомбінантні біотехнології ґрунтуються на використанні гену, який виділяють з одного організму і інтегрують у невеликий фрагмент ДНК-носія, тобто вектор. Виявлено особливість біопроцесу, відповідно до якого рекомбінантний білок, який експресується, знаходиться в низькій концентрації і є дуже розведеним. В зв'язку з цим розділення систем біомаси як важлива складова виробництва рекомбінантних білків досягається методами фільтрації, седиментації, сепарації, центрифугуванням, мікрофільтрації. Відповідно до узагальненої схеми виробництва рекомбінантних білків обґрунтовано специфіку процесів, обладнання та визначено фактори забезпечення ефективного біопроцесингу. Встановлено та обґрунтовано роль факторів продуктивності етапів розділення та концентрування первинного білка, що включає вихід за білком, ступінь відділення твердої фази, продуктивність центрифуги та життєздатність клітин.

Подальші наукові дослідження будуть направлені на вивчення і вдосконалення ефективності використання бактерії *E. coli* в біотехнології рекомбінантного інсуліну людини. Зазначене створить перспективи для виробництва різноманітних продуктів і розробки нових методів, які можуть вплинути на розвиток біофармацевтики.

Список використаної літератури

1. Berlec A., Štrukelj B. Current state and recent advances in biopharmaceutical production in *Escherichia coli*, yeasts and mammalian cells. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 2013. Vol. 40, Iss. 3-4. P. 257–274. <https://doi.org/10.1007/s10295-013-1235-0>.
2. Huang C.-J., Lin H., Yang X. Industrial production of recombinant therapeutics in *Escherichia coli* and its recent advancements. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 2012. Vol. 39, Iss. 3. P. 383–399. <https://doi.org/10.1007/s10295-011-1082-9>.
3. Keikha M., Eslami M., Yousefi B., Ghasemian A., Karbalaee M. Potential antigen candidates for subunit vaccine development against *Helicobacter pylori* infection. *Journal of Cellular Physiology*. First published: 12 June 2019. <https://doi.org/10.1002/jcp.28870>
4. Lee S.Y. High cell-density culture of *Escherichia coli* (Review). *Trends in Biotechnology*. 1996. Vol. 14, Iss. 3. P. 98–105. [10.1016/0167-7799\(96\)80930-9](https://doi.org/10.1016/0167-7799(96)80930-9)

5. Zhang J., Greasham R. Chemically defined media for commercial fermentations. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 1999. Vol. 51. P. 407–421. <https://doi.org/10.1007/s002530051411>
6. Kim J., Kim K.H. Effects of minimal media vs. complex media on the metabolite profiles of *Escherichia coli* and *Saccharomyces cerevisiae*. *Process Biochemistry*. 2017. Vol. 57. P. 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2017>.
7. Campani G., Santos M.P.d., Silva G.G.d., Horta A.C.L., Badino A.C., Giordano R.d.C., Gonçalves V.M., Zangirolami T.C. Recombinant protein production by engineered *Escherichia coli* in a pressurized airlift bioreactor: A techno-economic analysis. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2015. Vol. 98. P. 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2015.10.020>.
8. Figueiredo D.B., Carvalho E., Santos M.P., Kraschowetz S., Zanardo R.T., Campani G., Silva G.G., Sargo C.R., Horta A.C.L., Giordano R.d.C., Miyaji E.N., Zangirolami T.C., Cabrera-Crespo J., Gonçalves V.M. Production and purification of an untagged recombinant pneumococcal surface protein A (PspA4Pro) with high-purity and low endotoxin content. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 2015. Vol. 42. P. 1399–1408. [10.1007/s00253-016-7983-9](https://doi.org/10.1007/s00253-016-7983-9)
9. Shiloach, J., & Fass, R. Growing *E. coli* to high cell density – a historical perspective on method development. *Biotechnology Advances*, 2005. 23(5), 345–357. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2005.04.004>
10. Lardeux H., Duivelshof B.L., Colas O., Beck A., McCalley D.V., Guillarme D., D'Atri V. Alternative mobile phase additives for the characterization of protein biopharmaceuticals in liquid chromatography – Mass spectrometry. *Anal. Chim. Acta*, 2021. 1156, 338347. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338347>

References

1. Berlec, A., Štrukelj, B. (2013). Current state and recent advances in biopharmaceutical production in *Escherichia coli*, yeasts and mammalian cells. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. Vol. 40, Iss. 3-4. P. 257–274. <https://doi.org/10.1007/s10295-013-1235-0>.
2. Huang, C.-J., Lin H., Yang, X. (2012). Industrial production of recombinant therapeutics in *Escherichia coli* and its recent advancements. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. Vol. 39, Iss. 3. P. 383–399. <https://doi.org/10.1007/s10295-011-1082-9>.
3. Keikha, M., Eslami M., Yousefi, B., Ghasemian, A., Karbalaei, M. (2019). Potential antigen candidates for subunit vaccine development against *Helicobacter pylori* infection. *Journal of Cellular Physiology*. First published: 12 June 2019. <https://doi.org/10.1002/jcp.28870>
4. Lee S.Y. (1996). High cell-density culture of *Escherichia coli* (Review). *Trends in Biotechnology*. Vol. 14, Iss. 3. P. 98–105. [10.1016/0167-7799\(96\)80930-9](https://doi.org/10.1016/0167-7799(96)80930-9)
5. Zhang, J., Greasham, R. (1999). Chemically defined media for commercial fermentations. *Applied Microbiology and Biotechnology*. Vol. 51. P. 407–421. <https://doi.org/10.1007/s002530051411>
6. Kim, J., Kim, K.H. (2017). Effects of minimal media vs. complex media on the metabolite profiles of *Escherichia coli* and *Saccharomyces cerevisiae*. *Process Biochemistry*. Vol. 57. P. 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2017>.
7. Campani, G., Santos, M.P.d., Silva, G.G.d., Horta, A.C.L., Badino, A.C., Giordano, R.d.C., Gonçalves, V.M., Zangirolami, T.C. (2015). Recombinant protein production by engineered *Escherichia coli* in a pressurized airlift bioreactor: A techno-economic analysis. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. Vol. 98. P. 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2015.10.020>.
8. Figueiredo, D.B., Carvalho, E., Santos, M.P., Kraschowetz, S., Zanardo, R.T., Campani, G., Silva, G.G., Sargo, C.R., Horta, A.C.L., Giordano, R.d.C., Miyaji, E.N., Zangirolami, T.C., Cabrera-Crespo, J., Gonçalves, V.M. (2015). Production and purification of an untagged recombinant pneumococcal surface protein A (PspA4Pro) with high-purity and low endotoxin content. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. Vol. 42. P. 1399–1408. [10.1007/s00253-016-7983-9](https://doi.org/10.1007/s00253-016-7983-9)
9. Shiloach, J., & Fass, R. (2005). Growing *E. coli* to high cell density—a historical perspective on method development. *Biotechnology Advances*, 23(5), 345–357. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2005.04.004>
10. Lardeux, H., Duivelshof, B.L., Colas, O., Beck, A., McCalley, D.V., Guillarme, D., D'Atri, V. (2021). Alternative mobile phase additives for the characterization of protein biopharmaceuticals in liquid chromatography – Mass spectrometry. *Anal. Chim. Acta*, 1156, 338347. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.338347>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.11.2025
 Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 14.12.2025
 Дата публікації: 31.12.2025

Д. В. ЯНЮК

аспірант кафедри прикладної механіки та мехатроніки
Луцький національний технічний університет
ORCID: 0009-0002-9633-0620

ІНТЕГРАЛЬНА ОЦІНКА ВПЛИВУ СКОРОЧЕННЯ ОПЕРАЦІЇ ФОРМУВАННЯ ТОРЦЯ НА ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ ПРУТКОВИХ ЗАГОТОВОК

Робота присвячена виявленню впливу обробки торцевої поверхні пруткової заготовки на загальну ефективність виготовлення деталі з метою оцінки можливостей скорочення витрат. Основні результати роботи стосуються вирішення проблеми, що пов'язана з відсутністю методології, аналізу впливу обробки торцевої поверхні за системою безрозмірних індикаторів, яка лінійно транспонує технологічні зміни у відсоткові варіювання статей витрат. З цією метою проведено виявлення залежностей для формалізованого узагальненого вираження таких витрат. Проведено аналіз витрат, де складовими є вартість машинного часу, енергії, оплати праці, інструмента з урахуванням ресурсу й кількості ріжучих кромок. При цьому, розглянуто два варіанти циклу обробки деталі: зі зменшенням вдвічі припуском та без операції підрізання торця. При обчисленні часу циклу приймалися режими різання рекомендовані для інструментів та норми для верстатів з ЧПК. Враховані параметри: знос інструменту, затрати на допоміжні рухи, вартість зрізаного матеріалу, вартість роботи обладнання та оператора, накладні супутні витрати.

Отримані формалізовані вирази мають можливість масштабування від обчислення економічних параметрів одного циклу обробки до величини усієї запланованої партії деталей. Результати показали фінансову економію близько 5% при зменшенні припуску та до 20% економію при скасуванні операції. Зроблено висновок про доцільність підвищення точності осевого позиціонування заготовки, яка подається автоматична машинами для спрощення виробничого циклу в токарних верстатах масового виробництва. Дані рекомендації щодо впровадження представленої методики розрахунків у аналіз економічних витрат на інші процеси в металообробці в тому числі який виконується автоматичними системами планування.

Ключові слова: верстат, обробка різанням, системні закономірності, надійність позиціонування, проблема оптимізації, затиск у шпиндельному вузлі, системний аналіз, осеве положення.

D. V. YANYUK

Postgraduate Student at the Department of Applied Mechanics
and Mechatronics
Luts'k National Technical University
ORCID: 0009-0002-9633-0620

INTEGRAL ASSESSMENT OF THE IMPACT OF REDUCING THE END FORMING OPERATION ON THE EFFICIENCY INDICATORS OF TURNING PROCESSING OF BAR BLANKS

The work is devoted to identifying the impact of processing the end surface of a bar blank on the overall efficiency of part manufacturing in order to assess the potential for cost reduction. The main results of the work relate to solving the problem associated with the lack of methodology, analyzing the impact of end surface machining using a system of dimensionless indicators, which linearly transposes technological changes into percentage variations in loss items. To this end, dependencies were identified for a formalized generalized expression of such costs. An analysis of costs was carried out, where the components are the cost of machine time, energy, labor, tools, taking into account the resource and the number of cutting edges. At the same time, two options for the part processing cycle were considered: with a halved allowance and without end trimming. When calculating the cycle time, the cutting modes recommended for modern tools and time standards for CNC machines were used. Parameters such as tool wear, auxiliary movement costs, the cost of cut material, the cost of equipment and operator labor, and overhead costs were taken into account.

The formalized expressions obtained can be scaled from the calculation of the economic parameters of a single machining cycle to the value of the entire planned batch of parts. The results showed financial savings of about 5% when reducing the allowance and up to 20% savings when eliminating the operation. It was concluded that it is advisable to increase the accuracy of the axial positioning of the workpiece fed by automatic machines to simplify the production cycle in mass production lathes. These recommendations are for the further use and implementation of the presented

calculation methodology in the analysis of economic costs for other processes in metalworking, including those performed by automatic planning systems.

Key words: *machine tool, cutting machining, systemic regularities, positioning reliability, optimization problem, spindle unit clamping, system analysis, axial position.*

Постановка проблеми

Операції підрізання торців пруткових заготовок при токарній обробці є дуже поширеними адже виконуються на початку більшості циклів обробки, щоб забезпечити необхідне положення торцевої поверхні. Економія ресурсів та матеріалів при обробці торцевих поверхонь є особливо актуальною у серійному та масовому виробництві що зумовлюється кількістю продукції та стійкою світовою тенденцією до впровадження ощадливого виробництва. Автоматична обробка передбачає визначення положень оброблюваних поверхонь відносно системи координат верстата. Для уникнення невірної величини автоматичної подачі пруткового матеріалу зазвичай налаштовують на гарантовано більший розмір. Покращення параметрів функціонування машин автоматичної подачі та якості торця заготовки після відрізання попередньої деталі, дає можливість зменшити припуск, що знімається з наявної на початку обробки торцевої поверхні або взагалі відмовитися від даної операції. Для виявлення доцільності створення додаткових заходів по збільшенню точності осьового позиціонування торцевої поверхні прутка під час автоматичної подачі доцільно співставити дані витрати з ефектом можливої економії на операції підрізання торця. Однією з ключових проблем здійснення такої оцінки є врахування ряду різномірних факторів, що створюють бюджет витрат при формуванні торцевої поверхні. Можливість вираження оцінки витрат на формування торцевої поверхні у формальному вигляді створює передумови для покращення заходів щодо підвищення ефективності та економічності виготовлення деталей з пруткових заготовок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На момент дослідження [1] машинна обробка у США споживала 15% електроенергії тому автор класифікував основні статті витрат та наголосив на необхідності стратегій для зменшення споживання електроенергії. Стандарт [2] визначає методологічний підхід для оцінки екологічності металообробних верстатів. Для дослідження енергозатрат на процес різання у [3] розробили систему відстежування споживання головного приводу в режимі реального часу, однак як показала робота [4] допоміжні рухи верстатного комплексу можуть споживати до 80% електроенергії затраченого на процес різання. У праці [5] надано пропозиції щодо покращення умов затиску прутка, що створює передумови для покращення осьового позиціонування. У [6] виявили залежності впливу характеристик інструменту на енергозатрати при видаленні матеріалу із заготовки. Для розрахунку собівартості у дослідженні [7] використали інформацію витрат місячного циклу виробництва деталей однак не розробили методики для прогнозувати витрат на деталі іншого типу. У [8] розробили функцію розрахунку витрати на виробництво деталі токарним методом від декількох параметрів, врахували затрати на обслуговування, але не розглянули шляхів здешевлення процесу обробки. Дослідження [9] вказує на існування впливу параметрів верстату та стохастичних виробничих змінних на загальну вартість процесу виробництва одиниці продукції. Рекомендації автора зводяться до пошуку оптимальних параметрів різання. У [10] досягнуто зниження вартості виробництва деталі на 20%, через дослідження неефективних етапів циклу досліджуваного виробництва, що звукує область застосування результатів роботи.

Попри значну кількість праць, що стосуються обробки пруткового матеріалу у масовому виробництві і зокрема умов його автоматичної подачі для утворення заготовки в токарних верстатах, не виявлено цілісної методології, яка б у відносних показниках пов'язувала витрати на операцію підрізання торця з інтегральними ефектами від скорочення або її скасування. Зокрема, відсутній сценарний аналіз із розкладом за станами верстата і атрибуцією часток енергії, часу та простоїв до саме операції підрізання з узгодженою системою безрозмірних індикаторів, яка лінійно транспонує технологічні зміни у відсоткові зрушення статей витрат (машина, інструмент, енергія, праця, матеріал). Тобто, врахування специфічних чинників як передумов відмови від підрізання торця. Отже, розробка методики інтегральної відсоткової оцінки енергетичної, матеріальної та супутніх показників ефективності, що залежить від досягнутої точності осьового позиціонування торця із зменшенням припуску або відмовою від операції торцювання є актуальним завданням.

Формулювання мети дослідження

Об'єкт дослідження - процеси формування торцевої поверхні пруткової заготовки та відповідні стани роботи верстата.

Предмет дослідження – закономірності впливу процесів формування торцевої поверхні пруткової заготовки на інтегральні показники ефективності виготовлення деталі з пруткової заготовки.

Мета – отримати формалізоване представлення структури витрат, що виникають при обробці торця пруткової заготовки.

Викладення основного матеріалу дослідження

Економічний ефект від зменшення припуску підрізання торця або відмови від даної технологічної операції можна виявити на різних рівнях аналізу джерел споживання енергії та витрат. Використану енергію можна

оцінювати за станами верстата: готовність, холостий хід, розгін-гальмування, різання, зміна інструмента, обслуговування допоміжних систем. Це дає передумови створення декомпозиції етапів роботи з виокремленням секторів, що забезпечують економію часу й енергії (кВт·год) при скороченні або виключенні операцій. У металообробних верстатах частка чистого різання становить меншу частину від повної енергії, решта – некорисні стани, на які безпосередньо впливає скорочення тривалості операцій і кількості проходів.

Зменшення величини підрізання торця має загалом ряд позитивних ефектів, що відображаються на досить великій кількості характеристик механічної обробки та зникнення певних станів функціонування верстата. Можливо провести оцінку лише основних показників. Економічну моделі собівартості як агрегатну модель вартості на деталь можна виразити у вигляді

$$C = C_{\text{загот}} + C_{\text{верст}} + C_{\text{оператора}} + C_{\text{інструм}}$$

– де складові це вартість машинного часу, енергії, оплати праці, інструмента з урахуванням ресурсу й кількості ріжучих кромок. Узагальнений емпіричний розподіл витрат вказує, що найбільші частки припадає на верстат і інструмент; енергія має меншу частку, але за великих обсягів її економія відчутна і помітну економію також дає зменшення часу. Це загалом аргументує користь скорочення або усунення підрізання торцевої поверхні заготовки.

Окремою сферою економії можна вважати матеріал, відходи та вплив на екологію. Системний список стадій, що формують екологічний слід можна вважати наступним: виробництво матеріалу, різання матеріалу, підготовка та утилізація ЗОР, виготовлення верстата та інструмента, очистка. Скорочення припуску напругу зменшує перетворення матеріал у стружку і пов'язані етапи енергетики та викидів [3].

Метод підрахунку базується на оцінюванні сировинних та енергетичних втрат яких можна уникнути при зменшенні величини підрізання торця або уникнення даної технологічної операції шляхом підвищення точності позиціонування торцевої поверхні заготовки, що отримана після відрізання виготовленої деталі. Тобто, підрахунок базується на врахуванні кількості матеріалу який потрібно перетворити у стружку та ресурсу, що необхідний для даного процесу (енергія різання, машинний час, ресурс і т.д.).

Доцільно розглянути два варіанти.

У варіанті 1 (рси. 1, S1) не виконується прохід по торцю, оскільки його розташування в координатах верстата здійснено точно завдяки достатній точності величини подачі, а отже зникає використання і часу різання, і допоміжного часу.

У варіанті 2 (рис. 1, S2) обсяг і енергія різання зменшується у 2 рази відносно бази 0,6 мм, але інші параметри обробки залишаємо незмінними

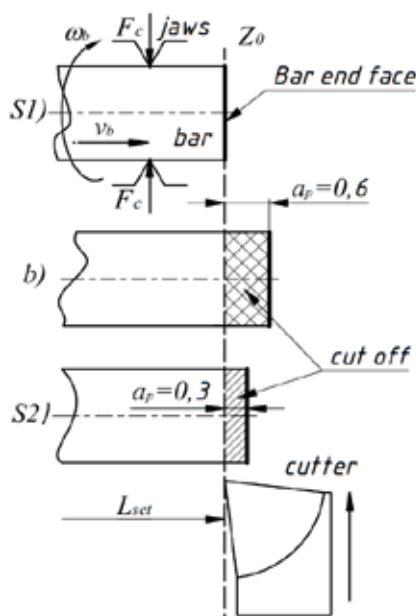


Рис. 1. Положення торця заготовки коли: S1) – вона не потребує підрізання торця, b) потребує зрізання значного припуску S2) припуск зменшено вдвічі

Приймаємо діаметр пруткового матеріалу $D=40\text{мм}$, тоді площа поперечного перерізу $A=\pi D^2/4=1256,637\text{ мм}^2$. Припуск на підрізання a_p – осьова товщина шару, яку потрібно зняти з торця з метою зміни його розташування в задане положення в системі координат верстата. Приймаємо як базовий припуск на підрізання $a_{p0}=0,6\text{мм}$ та

варіант зменшення припуску на $\Delta a_p = 0,3$ мм. Для об'єму шару який знімається $V = A \cdot a_p$ [мм³] при густині $\rho = 7,85 \times 10^{-3}$ г/мм³ його маса (маса стружки) визначається як $m = \rho V$ [г]. Енергія різання: $E = uV$ [Дж], де u – питома енергія різання (сталі: $u \approx 2,5\text{--}4,0$ Дж/мм³) а у ват-годинах: $E_{\text{Wh}} = E/3600$.

Час підрізання торця (якщо операція виконується) затрачається на радіальний прохід від $R = D/2 = 20$ мм до 0 при подачі f_r [мм/об] і частоті n [об/хв],

$$t_{\text{face}} = \frac{R}{f_r n} 60 \text{ с.}$$

Відповідно до рекомендацій виробника інструменту [11] можна прийняти подачу $f_r = 0,15$ мм/об, та при сталій рекомендованій швидкості різання для максимального діаметру обробки торця $v_c = 100\text{--}250$ м/хв частота обертання:

$$n = \frac{v_c \times 1000}{\pi \times D} \approx 800\text{--}1600 \text{ об/хв.}$$

Тоді при наших умовах $t_{\text{face}} = 5\text{--}10$ с, а допоміжний час підходу та відводу різця додається окремо і може становити $t_{\text{aux}} = 0,4\text{--}0,8$ с.

При повній відмові від підрізання торця, коли базовий припуск $a_{p0} = 0,6$ мм не знімається, досягається економія ряду ресурсів: об'єму $V_0 = A \cdot a_{p0}$ й маси $m_0 = \rho V_0$ матеріалу. Економія енергії різання $E_0 = uV_0$ та часу $t_{\text{face}} + t_{\text{aux}}$ на деталь. Об'єм який не перетворюють у стружку $V_0 = 754$ мм³, $m_0 = 5,915$ г, $E_0 = 1885\text{--}3016$ Дж (0,524–0,838 Wh).

Для випадку S2, коли підрізання лишається, але припуск зменшено на $\Delta a_p = 0,3$ мм стружки утворюється менше звідки впливає економія об'єму $\Delta V = A \Delta a_p$ й маси $\Delta m = \rho \Delta V$, економія енергії $\Delta E = u \Delta V$. Економія часу обробки є незначною оскільки при сталих f_r, n та повному радіальному проході не залежить від осрової товщини припуску. При $\Delta a_p = 0,3$ мм, $\Delta V = 377$ мм³, $\Delta m = 2,957$ г, $\Delta E = 942\text{--}1508$ Дж (0,262–0,419 Wh) (табл. 1).

Таблиця 1

Результати економії на один цикл обробки

Випадок	Ефект по припуску, мм	Зекономлений об'єм (V), мм ³	Маса (m), г	Спожита енергія на різання (E), Wh	Економія часу, с.
№ 1 Повністю без підрізання	$a_{p0} = 0,6$ мм	$A \cdot 0,6 = 754$	5,915	0,524 – 0,838	5-10
№ 2 Підрізання лишається, припуск – 0,3 мм	$\Delta a_p = 0,3$ мм	$A \cdot 0,3 = 377$	2,957	0,262 – 0,419	≈ 0

Припущення та інтерпретація. При підрізанні здійснюється повний прохід по всьому радіусу а тому t_{face} майже не залежить від a_p . u прийнято усередненим для сталей а реальні значення змінюються з маркою, геометрією різця, товщиною стружки та змащенням. Електроспоживання верстата може визначатися як $E_{\text{el}} = E/\eta$ з ефективністю $\eta \approx 0,5\text{--}0,7$, або ж завдяки інтегрованим в електричних щитах ватметрам [7].

Для визначення економії в межах партії величиною Q можна здійснювати масштабування ефектів з одного циклу обробки (1 деталь) шляхом домноження отриманих величин на Q . Для партії величиною $Q = 10^6$ варіант № 1 дає економію матеріалу 5,915 т та 524–838 кВт·год різальної енергії і приблизно 1389–2778 годин машинного часу. Для варіанту S2 економія 2,957 т матеріалу та 262–419 кВт·год енергії.

Індекс зношування кромки різця Λ – безрозмірний відносний показник внеску конкретної операції у знос інструмента. Для швидкої оцінки приймають $\Lambda \sim E_{\text{cut}}$ енергія різання цієї операції. Тоді вилучення операції дає $\Lambda = 0$. Зменшення припуску вдвічі дає $\Lambda = 0,5$. Енергія різання для операції

$$E_{\text{cut}} = \int P_{\text{cut}}(t) dt \approx uV,$$

де u – питома енергія різання, V – об'єм знятого матеріалу, потужність різання P_{cut} та час контакту t . Індекс зношування кромки,

$$\Lambda = \frac{E_{\text{cut}}}{E_{\text{cut}}^{\text{base}}},$$

відносно базового режиму (припуску) для тієї самої операції, інструмента й матеріалу. Тобто, за фіксованих v_c , f , геометрії й ЗОР питома енергія u слабо змінюється, тож Λ лінійно масштабується з об'ємом V . Сумарний знос за цикл є сумою внесків усіх операцій, кожна з власним Λ_i .

Грошовий ефект від зменшення припуску підрізання торця або відмови від операції оцінюється через відсоткові зміни складових собівартості, що прив'язані до зменшення об'єму стружки, енергії процесу і машинного часу. Формалізація відсоткового вираження економії виражається через декомпозицію собівартості на статті витрат і безрозмірні індикатори, що прив'язують кожну статтю до зменшення часу, енергії, інструменту та матеріалу від операції підрізання.

Повна собівартість одиниці продукції,

$$C_{tot} = C_{mach} + C_{op} + C_{OH} + C_{en} + C_{tool} + C_{mat}.$$

Ваги статей як частки у відсотках, що сумарно дають 1,

$$w_i = C_i / C_{tot}; \sum w_i = 1,$$

де $i \in \{mach, op, OH, en, tool, mat\}$;

C_{mach} – машинний час × ставка (амортизація, ремонт, обслуговування, енергія базових систем, без врахування оплати оператора).

C_{op} – оплата праці, що масштабується з тривалістю циклу.

C_{OH} – накладні витрати (постійні) але у масовому потоці також ефективно масштабується з часом завантаження.

C_{en} – електроенергія процесу (за цикл).

C_{tool} – інструмент і його переточки/заміни, пропорційні навантаженню і часу різання.

C_{mat} – вартість заготовки; тут нас цікавить лише частка, що йшла у стружку підрізанням торця.

У відсотковій оцінці кожна стаття зменшується на частку, що відповідає вилученому внеску операції підрізання.

Безрозмірні індикатори β є зв'язуючою ланкою між технологічною зміною і статтями витрат. Часовий індикатор,

$$\beta_t = \frac{t_{face} + t_{aux}}{t_{cyc}},$$

де t_{cyc} – час повного цикл обробки деталі. β_t – відносна частка циклу, що зникає при відмові від підрізання, при зменшенні припуску $\beta \approx 0$ (радіальний прохід залишається).

Енергетичний індикатор:

$$\beta_E = \frac{E_{face}}{E_{MT}},$$

де E_{MT} – повна електроенергія верстата за цикл; E_{face} – енерговнесок операції підрізання. У мінімальній моделі

$$E_{face} = \frac{u A a_{p0}}{3600}$$

Індикатор інструмента:

$$\beta_{tool} = \frac{E_{face}}{E_{cut,tot}},$$

де $E_{cut,tot}$ – сумарна енергія різання за всі операції циклу. Ця залежність збільшує частку зносу й витрат на інструмент, що припадає саме на підрізання, при збільшенні кількості циклів.

Індикатор зрізаного матеріалу торця β_{mat} як відносна частка грошей у C_{tot} , які витрачались саме на зрізаний операцією підрізання торця об'єм матеріалу,

$$\beta_{mat} = \frac{\rho A a_{p0} c_m}{C_{tot}},$$

де c_m – ціна матеріалу [грн/кг].

Перехід від означень індикатором β до вираження відсоткової економії за статтями. Для сценарію при повній відмові від підрізання (S1):

часові статті зменшуються на β_t : $\Delta C_{mach} / C_{tot} = w_{mach} \beta_t$, аналогічно для w_{op} , w_{OH} ; енергія: $\Delta C_{en} / C_{tot} = w_{en} \beta_E$; інструмент: $\Delta C_{tool} / C_{tot} = w_{tool} \beta_{tool}$; матеріал торця: $\Delta C_{mat} / C_{tot} = \beta_{mat}$. Звідси сумарна відсоткова економія:

$$\% \Delta C_{tot} = 100[(w_{mach} + w_{op} + w_{OH})\beta_t + w_{en}\beta_E + w_{tool}\beta_{tool} + \beta_{mat}].$$

Сценарій при якому операція залишається але припуск зменшено на Δa_p (S2) що провокує зменшення витрат енергії, інструменту, матеріалу лінійно з об'ємом за коефіцієнтом $\Delta a_p / a_{p0}$, однак не передбачає зменшення часових витрат:

$$\% \Delta C_{tot} = 100[w_{en}\beta_E \Delta a_p / a_{p0} + w_{tool}\beta_{tool} \Delta a_p / a_{p0} + \beta_{mat} \Delta a_p / a_{p0}]$$

Припущення і валідність даних розрахунків пояснюється наступним. Лінійність залежності витрат енергії та зносу інструменту від об'єму зрізаного матеріалу коректна за сталих v_c, f , геометрії і ЗОР а при зміні режимів потрібна корекція. Накладні C_{OH} у масовому потоці обґрунтовано ототожнювати з часозалежними, якщо їх розподіляють на одиницю продукції через завантаження обладнання. Для сценарію S2 часовий ефект нульовий, оскільки підрізання передбачає повний радіальний прохід. Тобто величини $w\{\}$ та $\beta\{\}$ означають відповідно базові ваги витрат та другі відносні ключі перетворення технологічної зміни на відсоткове здешевлення по кожній статті й загалом.

Тлумачення складових отриманої формули може бути наступним. $(w_{mach} + w_{op} + w_{OH})\beta_t$ вказує на відсоток, на який зменшуються машинна складова, оплата праці та постійні витрати, оскільки вони лінійно прив'язані до часу

циклу. $w_{en}\beta_E$ – це частка енергії циклу, що припадає на підрізання. $w_{tool}\beta_{tool}$ виражає внесок цієї операції у витрати на інструмент протягом одного циклу (добре апроксимується пропорційно енергії/часу різання). β_{mat} є відносною часткою грошей на матеріал, що використовується для частки торця яку потрібно зрізати у повній собівартості. Для сценарію де лишається підрізання торця S2 усі «енерго-матеріально-інструментальні» ефекти масштабуються коефіцієнтом $\Delta a_p/a_{p0}$, але часові втрати – ні.

Розрахунок зменшення втрат, відповідно до припущення про структуру витрат і часові частки циклу

Вихідні ваги статей витрат можуть бути представлені як вектори часток повної собівартості тому їхня повна сума завжди буде рівна 1 (100%). Приймаючи до розрахунку виробничі параметри описані вище орієнтовні ваги можуть бути наступними: $w_{mach}=0,42$ – машинний час; $w_{tool}=0,38$ – інструмент; $w_{op}=0,12$ – оплата праці; $w_{en}=0,08$ – електроенергія; $w_{OH}=0$ – окремо не виділяються; матеріал торця входить через β_{mat} .

Часові параметри та β_i можуть бути прийнятими наступними: час підрізання $t_{face}=4,0$ с, допоміжний $t_{aux}=0,6$ с. Для прикладу можна розглянути два варіанта: серійний цикл $t_{cyc}=20$ с $\Rightarrow \beta_i=0,23$; довгий цикл $t_{cyc}=40$ с $\Rightarrow \beta_i=0,115$. Такі значення відображають частину повного часу яку займає саме підрізання з підведенням інструменту, тобто чим більше часу займають інші операції обробки тим менша частка часу циклу йде на обробку торця.

Енергетичний індикатор β_E виражається через енергію підрізання E_{face} ділиться на повну енергію циклу верстата E_{MT} . Для орієнтиру доцільно взяти взято $E_{MT}\approx 8\text{--}12$ Вт·год/дет. За типовим E_{face} це дає $\beta_E\approx 4\text{--}10\%$. Тобто, таким чином оцінюється частка електроенергії, яка припадає на підрізання в енергобалансі циклу.

Інструментальний індикатор β_{tool} виражає апроксимацію частки витрат інструмента, що спричинена саме підрізанням в якій $t_{cut,tot}$ – сумарний час чистого різання в циклі. Орієнтовне значення для двох сценаріїв навантаження інструмента може бути $\beta_{tool}=0,20$ та $0,35$. Таким чином відображається чутливість підсумку до того, яку частку зносу (вартості) інструмента створює саме підрізання. Два варіанта t_{cyc} і β_{tool} відображають діапазон результатів для різної насиченості циклу різанням і різної ролі підрізання у зносі. Короткий цикл підсилює вагу β_i ; високий β_{tool} підсилює інструментальну складову. Це дає можливість означити загальний рівень чутливості аналізу.

Матеріальний індикатор β_{mat} відображає грошовий еквівалент частки матеріалу, що перетворювався у стружку при базовому припуску. Її підставляють у формулу як додачу матеріальної економії.

При відмові від підрізання торця (S1).

Якщо $t_{cyc}=20$ с, $\beta_i=0,23$, $\beta_E=0,07$, $\beta_{tool}=0,2$:

$$\% \Delta C_{tot} \approx 100[(0,42+0,12) \cdot 0,23 + 0,08 \cdot 0,07 + 0,38 \cdot 0,2 + \beta_{mat}] \approx 100[0,124 + 0,006 + 0,076 + \beta_{mat}] = 20,6\% + 100\beta_{mat}.$$

Якщо $t_{cyc}=40$ с, $\beta_i=0,115$, $\beta_E=0,05$, $\beta_{tool}=0,35$, тоді:

$$\% \Delta C_{tot} \approx 100[0,061 + 0,04 + 0,133 + \beta_{mat}] = 19,8\% + 100\beta_{mat}.$$

При наявності підрізання торця (S2) з припуском $\Delta a_p=0,3$ мм. Тоді, $\Delta a_p/a_{p0}=0,5 \Rightarrow \theta_E=0,5\beta_E$, $\theta_{tool}=0,5\beta_{tool}$, $\theta_{mat}=0,5\beta_{mat}$, $\theta_i \approx 0$. Для $\beta_E=0,07$, $\beta_{tool}=0,2$:

$$\% \Delta C_{tot} \approx 100[0,08 \cdot 0,035 + 0,38 \cdot 0,1 + 0,5\beta_{mat}] = 4\% + 50\beta_{mat}.$$

Для $\beta_E=0,05$, $\beta_{tool}=0,35$:

$$\% \Delta C_{tot} \approx 100[0,08 \cdot 0,025 + 0,38 \cdot 0,175 + 0,5\beta_{mat}] = 7,1\% + 50\beta_{mat}$$

Варто відзначити, що відсоткові ефекти чутливі до β_i , β_E , β_{tool} . Вони визначаються виміром енергопрофілю та розкладом часу за станами циклу конкретного верстата. Для варіанту з уникненням операції підрізання торця потрібно забезпечити відповідно до підвищених вимог сукупність параметрів функціонування машини автоматичної подачі прутка, інакше економія часу може бути нівельована додатковими операціями контролю або відшкодуванням утвореного браку. Значення β_{mat} залежить від частки вартості матеріалу у собівартості. Такий розрахунок дає вставний, відтворюваний у відсотках вираз позитивного ефекту для обох сценаріїв де потрібно вказати поточні параметри $w\{\}$, β -параметри, c_m і C_{tot} , отримані з вимірюного циклу та обліку.

Висновки

Результат досліджень дають можливість формального представлення економічної моделі підрахунку витрат на обробку торцевої поверхні деталі методом точіння. Після аналізу її компонентів та розрахунків на основі рекомендаційних даних виробників інструментів про режими різання, отримано відсоткові показники витрат на операцію підрізання торця враховуючи різні параметри циклу. Результати розрахунків вказують на можливість економії до 20% ресурсів за рахунок скасування операції підрізання торця. Цього можна досягнути шляхом підвищення точності осьового позиціонування заготовки при її формуванні методом автоматичної подачі довгомірного пруткового матеріалу.

Результати розрахунків демонструють економічну доцільність подальших розробок присвячених дослідженню та підвищенню точності машин для автоматичної подачі прутків у токарні верстати. Універсальність отриманих залежностей вказує на можливість та доречність інтеграції розрахункової моделі витрат на обробку торцевої поверхні у різні форми токарної обробки з метою покращення умов визначення ключових витрат та розробки методів їх скорочення.

Список використаної літератури

1. Energy consumption in machining: Classification, prediction, and reduction strategy / G. Y. Zhao та ін. *Energy*. 2017. Т. 133. С. 142–157. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.110>.
2. ISO 14955:2020. Machine tools – Environmental evaluation of machine tools – Part 3: Principles for testing metal-cutting machine tools with respect to energy efficiency.
3. Al-Sulaiman F. A., Baseer M. A., Sheikh A. K. Use of electrical power for online monitoring of tool condition. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Т. 166, № 3. С. 364–371. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.07.104>.
4. Energy efficient process planning for CNC machining / S. T. Newman та ін. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2012. Т. 5, № 2. С. 127–136. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2012.03.007>.
5. Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. Приводи затискних механізмів металообробних верстатів: монографія. – Луцьк: Вежа Друк, 2016. – 352 с.
6. Vijayaraghavan A., Dornfeld D. Automated energy monitoring of machine tools. *CIRP Annals*. 2010. Т. 59, № 1. С. 21–24. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.042>.
7. Fit manufacturing: mapping product cost requirements using relational database design / Ebrahim, Z., Anawar, S., Cheah, A.C. 2015. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:73614513>.
8. Cost optimization of the AISI-1018 turning process under sustainable manufacturing / M. Cesén та ін. *Materials today: proceedings*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.473>.
9. Impact of stochastic industrial variables on the cost optimization of AISI 52100 hardened-steel turning process / A. F. Torres та ін. *The international journal of advanced manufacturing technology*. 2019. Т. 104, № 9-12. С. 4331–4340. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04273-1>.
10. Al Ghifary H., Sukanta S., Suseno A. Perhitungan Ongkos Operasi pada Produk Inner Tube Berdasarkan Distribusi Beban Ongkos. *Akuntansi Dewantara*, 2021, vol. 5, no. 2, pp. 1–6. DOI: 10.26460/ad.v5i2.8278.
11. Каталог Sandvik Coromant. *polidecktech.com*. URL: <https://polidecktech.com/all-catalogs/catalog-sandvik-coromant> (дата звернення: 07.11.2025).

References

1. Zhao, G. Y., Liu, Z. Y., He, Y., Cao, H. J., & Guo, Y. B. (2017). Energy consumption in machining: Classification, prediction, and reduction strategy. *Energy*, 133, 142–157. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.110>
2. International Organization for Standardization. (2020). ISO 14955:2020 Machine tools – Environmental evaluation of machine tools – Part 3: Principles for testing metal-cutting machine tools with respect to energy efficiency.
3. Al-Sulaiman, F. A., Abdul Baseer, M., & Sheikh, A. K. (2005). Use of electrical power for online monitoring of tool condition. *Journal of Materials Processing Technology*, 166(3), 364–371. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.07.104>
4. Newman, S. T., Nassehi, A., Imani-Asrai, R., & Dhokia, V. (2012). Energy efficient process planning for CNC machining. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 5(2), 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2012.03.007>
5. Кузнецов, Ю. М., & Придальний, Б. І. (2016). *Приводи затискних механізмів металообробних верстатів*. Луцьк: Вежа Друк.
6. Vijayaraghavan, A., & Dornfeld, D. (2010). Automated energy monitoring of machine tools. *CIRP Annals*, 59(1), 21–24. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.042>
7. Ebrahim, Z., Anawar, S., & Cheah, A. (2015). FIT MANUFACTURING: MAPPING PRODUCT COST REQUIREMENTS USING RELATIONAL DATABASE DESIGN. *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)*, 9(1). URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:73614513>
8. Cesén, M., Vila, C., Ayabaca, C., Zambrano, I., Valverde, J., & Fuentes, P. (2022). Cost optimization of the AISI-1018 turning process under sustainable manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 49(1), 58–63. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.473>
9. Torres, A. F., de Almeida, F. A., de Paiva, A. P., et al. (2019). Impact of stochastic industrial variables on the cost optimization of AISI 52100 hardened-steel turning process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104, 4331–4340. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04273-1>
10. Al Ghifary, H., Sukanta, S., & Suseno, A. (2021). Perhitungan Ongkos Operasi pada Produk Inner Tube Berdasarkan Distribusi Beban Ongkos. *AKUNTANSI DEWANTARA*, 5(2), 1–6. <https://doi.org/10.26460/ad.v5i2.8278>
11. Каталог Sandvik Coromant. (2020). Токарні інструменти polidecktech.com. <https://polidecktech.com/all-catalogs/catalog-sandvik-coromant>

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.11.2025
 Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 17.12.2025
 Дата публікації: 31.12.2025

ТЕХНОЛОГІЯ ЛЕГКОЇ ТА ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 677.075:[687.254:615.477.2

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.4.1.47>

Л. Є. ГАЛАВСЬКА

доктор технічних наук, професор
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0002-6994-6641

Ю. М. ХАРЧЕНКО

кандидат технічних наук
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0009-0007-9738-087X

С. І. АРАБУЛІ

кандидат технічних наук, доцент
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0003-1049-8255

А. Т. АРАБУЛІ

кандидат технічних наук, доцент
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0002-2583-4998

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ГІГІЄНІЧНІ
ВЛАСТИВОСТІ ТРИКОТАЖНОГО МАТЕРІАЛУ ЧОХЛА ДЛЯ КУЛЬТИ

У межах дослідження розроблено структуру трубчастого трикотажного матеріалу з еластомерною ниткою, розташованою в структурі ґрунту у вигляді пресових накидів та протяжок з використанням двох рапортів її прокладання: 1+1 та 1+3. Дослідні зразки вироблено на круглопанчіному автоматі 13 класу з діаметром циліндра 3,75 дюйма. У процесі в'язання здійснювалося регулювання натягу еластомерної нитки шляхом зміни швидкості її подачі, що дозволило забезпечити компресійний ефект та рівномірний розподіл тиску по поверхні трикотажного матеріалу.

Виявлено характер впливу щільності в'язання ґрунту, швидкості подачі еластомерної нитки та рапорту її прокладання в структуру трикотажу на гігієнічні характеристики трикотажного матеріалу, зокрема: гігроскопічність, паро- та повітропроникність. На рівень та характер зміни паро- та повітропроникності зі зміною швидкості подачі еластомерної нитки має суттєвий вплив рапорт її прокладання у петельну структуру трикотажного матеріалу. Збільшення щільності в'язання по вертикалі призводить до зниження величини досліджуваних показників гігієнічних властивостей, що обумовлено зменшенням наскрізної пористості трикотажного матеріалу.

У ході дослідження визначено, що за певних технологічних параметрів в'язання гігроскопічність компресійних трикотажних матеріалів становить не менше 4%, повітропроникність – не менше 135 дм³/м²·с, паропро-
никність – не менше 5,6 мг/см²·год. Встановлені кореляційні залежності дозволяють здійснювати вибір параметрів в'язання для одержання компресійного трикотажного матеріалу із заданими гігієнічними властивостями. Таким чином, результати отриманих досліджень створюють передумови для подальшої розробки вітчизняних функціональних трикотажних матеріалів медичного призначення з комплексом компресійних та гігієнічних властивостей й достатнім рівнем комфортності, придатних для застосування на різних етапах лікування та реабілітації осіб з ампутованими кінцівками.

Ключові слова: медичний текстиль, трикотажний матеріал, повітропроникність трикотажу, паропро-
никність трикотажу, гігроскопічність трикотажу, чохол для кукси, еластомерна нитка.

L. YE. HALAVSKA

Doctor of Technical Sciences, Professor
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0002-6994-6641

YU. M. KHARCHENKO

Candidate of Technical Sciences

Kyiv National University of Technologies and Design

ORCID: 0009-0007-9738-087X

S. I. ARABULI

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Kyiv National University of Technologies and Design

ORCID: 0000-0003-1049-8255

A. T. ARABULI

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Kyiv National University of Technologies and Design

ORCID: 0000-0002-2583-4998

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE HYGIENIC PROPERTIES OF A KNITTED MATERIAL COVER FOR STUMPS

Within the scope of the study, a structure of tubular knitted fabric with an elastomeric yarn arrangement in the soil structure was developed, utilizing a tuck stitch and float stitch, and employing a 1+1 and 1+3 laying pattern. The experimental samples were produced on a class 13 circular knitting machine with a cylinder diameter of 3.75 inches. During knitting, the tension of the elastomeric thread was adjusted by changing its feed speed, which ensured a compression effect and uniform pressure distribution over the surface of the knitted fabric.

The nature of the influence of soil knitting density, elastomeric thread feed rate, and laying pattern on the hygienic characteristics of knitwear, specifically hygroscopicity, vapor permeability, and air permeability, has been revealed. The level and nature of changes in vapor and air permeability with changes in the feed rate of the elastomeric thread are significantly influenced by its pattern in the loop structure of the knitted fabric. An increase in the vertical knitting density leads to a decrease in the values of the studied indicators of hygienic properties, which is due to a decrease in the through-porosity of the knitted material.

The study found that under certain knitting parameters, the hygroscopicity of compression knitted fabrics is at least 4%, air permeability is at least 135 dm³/m²·s, and vapor permeability is at least 5.6 mg/cm²·h. The established correlation dependencies allow the selection of knitting parameters to obtain a compression-knit material with specified hygienic properties. Thus, the results of the studies create the prerequisites for the further development of domestic functional knitted materials for medical use, possessing a complex of compression and hygienic properties, as well as a sufficient level of comfort, suitable for use at various stages of treatment and rehabilitation of individuals with amputated limbs.

Key words: medical textiles, knitted fabric, air permeability of knitted fabric, vapor permeability of knitted fabric, hygroscopicity of knitted fabric, stump cover, elastomeric thread.

Постановка проблеми

Довготривала й виснажлива війна в Україні мало не щодня призводить до значної кількості постраждалих з мінно-вибуховими пораненнями не лише серед військових, а й цивільного населення [1, 2]. Зокрема статистика людей з травматичною ампутацією доводить доцільність створення функціональних трикотажних виробів, які забезпечуватимуть оптимальний рівень гігієнічності, комфортності та компресії на етапі формування культі, запобігатимуть післяопераційним ускладненням та сприятимуть ефективній реабілітації [3, 4].

Ключовими аспектами забезпечення компресійної терапії та комфортності виробу є науково обґрунтований підбір трикотажної структури та технологічних параметрів в'язання, що забезпечуватимуть формування необхідних гігієнічних характеристик матеріалу та оптимальної компресії виробу заданої форми, призначеного для догляду за ампутованою кінцівкою на етапі реабілітації перед протезуванням [5-7]. При цьому фізико-механічні й експлуатаційні характеристики трикотажного матеріалу визначаються структурою переплетення ґрунту та способом введення еластомерної нитки.

Таким чином, розробка компресійних трикотажних матеріалів замкнутого контуру й дослідження їхніх гігієнічних властивостей є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої сприятиме створенню компресійних чохла для культі вітчизняного виробництва із заданим рівнем гігроскопічності, паро- та повітропроникності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Трикотажні матеріали завдяки своїм унікальним властивостям, таким як еластичність, комфортність та здатність регулювати функціональні характеристики шляхом зміни структури переплетення та параметрів в'язання, широко застосовуються у виготовленні функціональних захисних виробів, різноманітного асортименту виробів білизняного, спортивного та медичного призначення [8-10]. Зокрема значну частину медичного текстилю складають вироби, призначені для компресійної терапії, яка є ефективним методом на етапі загоєння ранової поверхні та

формування культі після ампутації кінцівки. Зазвичай для виготовлення чохлів для культі використовують технологію одержання виробів трубчастої форми, у процесі виготовлення яких формується мисок і в структуру трикотажного матеріалу вводиться еластомерна нитка [11,12]. Компресійні чохли можуть мати різноманітні конструктивні особливості в залежності від ділянки ампутації кінцівки та призначення [3]. Розуміння фізико-механічних й гігієнічних властивостей функціональних трикотажних матеріалів, їх взаємозв'язку з кінцевим призначенням стають основою для проведення наукових досліджень, класифікації, контролю якості та оптимального вибору пражі і ниток для їхнього виробництва.

Ключовим показником функціональності трикотажних виробів є термофізіологічний комфорт, який визначає загальне відчуття зручності при експлуатації виробу. Комфортність носіння трикотажного виробу є складним явищем, що формується під впливом різноманітних факторів, включаючи фізичні та нефізичні подразники в умовах певного середовища. Одним із основних чинників, що визначають комфорт, є структура переплетення трикотажного матеріалу. Властивості термофізіологічного комфорту – теплопровідність, паропроникність, повітропроникність, швидкість висихання, вологостійкість та інші – можуть бути змінені шляхом варіювання параметрів структури трикотажу [10,13, 14].

У наукових дослідженнях гігієнічних властивостей текстильних матеріалів автори підкреслюють, що вирішальну роль у формуванні комфортних характеристик відіграють сировинний склад пражі та ниток, а також структура переплетення [15-17]. Показники передачі водяної пари та тепла крізь текстильний матеріал визначають рівень теплового комфорту користувача [18].

Геометричні параметри петельної структури трикотажу є важливими для оцінки та моделювання функціональних характеристик, зокрема повітропроникності. Матеріали з більшою площею поверхні або більшими порами забезпечують інтенсивнішу циркуляцію повітря, що сприяє охолодженню шкірного покриву тіла користувача. Дослідження багатьох авторів підтверджують можливість прогнозування повітро- та паропроникності на основі заданих параметрів структури трикотажного матеріалу [19, 20]. Відносна паропроникність забезпечує додаткову інформацію про здатність матеріалу поглинати та відводити вологу [21-22].

Експериментальні дані свідчать, що різні види в'язаних структур проявляють відмінні характеристики теплового комфорту, зокрема щодо теплопровідності, повітропроникності та паропроникності, що підкреслює важливість вибору структури переплетення залежно від призначення трикотажного виробу [23-25].

Наразі науковцями ведеться постійна робота у напрямку створення нових трикотажних матеріалів медичного призначення. Однак процес розробки функціональних трикотажних матеріалів трубчастої форми, що використовуються у виробництві чохлів для культі, передбачає вивчення характеру впливу технологічних параметрів в'язання на їхні гігієнічні властивості. Аналіз наукових праць за напрямом досліджень дозволив сформулювати мету, задачі досліджень та методи їх реалізації.

Формулювання мети дослідження

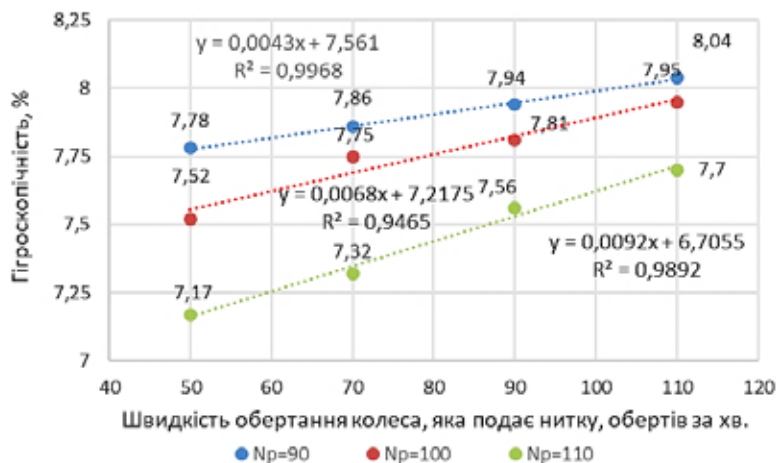
Метою даної роботи є вивчення впливу технологічних параметрів виробництва трикотажного матеріалу, виробленого на круглов'язальному обладнанні малого діаметру, на його гігієнічні властивості. Зокрема, дослідження впливу швидкості подачі еластомерної нитки у зону в'язання, рапорту її розташування у петельній структурі ґрунту та щільності по вертикалі трикотажного полотна на рівень гігроскопічності, повітро- та паропроникності.

Викладення основного матеріалу дослідження

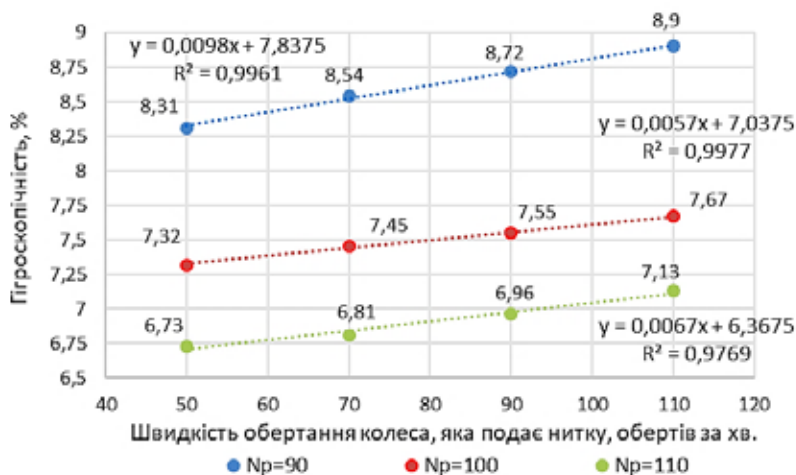
Гігієнічні властивості компресійного трикотажного матеріалу, який під час експлуатації виробу безпосередньо контактує з тілом людини, є важливими характеристиками тактильного комфорту та функціональності. Для реалізації поставленої у роботі задачі досліджень на однофонтурному круглов'язальному обладнанні з діаметром циліндра 3,75 дюйма та кількістю працюючих голок 168 вироблено зразки трикотажних матеріалів платированим переплетенням, які відрізнялися за рапортом прокладання еластомерної нитки 7,7 текс з подвійним обплетенням текстурованою поліефірною ниткою 4,4 текс: 1+1 чи 1+3. При чому у випадку використання рапорту 1+1 еластомерна нитка у кожному циклі петлетворення прокладалася зі зміщенням на один петельний крок (у шаховому порядку). У якості платировочної нитки використано бавовняну пражу лінійної густини 20 текс, у якості ґрунтової – поліамідну текстуровану нитку лінійної густини 4,4 текс з еластановим сердечником. При цьому щільність в'язання по вертикалі змінювали на трьох рівнях (90, 100 та 110 петельних рядів у 100 мм трикотажу), а швидкість подачі еластомерної нитки у зону в'язання на 4 рівнях (швидкість колеса, що подає еластомерну нитку 50, 70, 90, 110 обертів за хвилину) [26, 27].

У ході попередніх досліджень нами визначено параметри структури [27, табл. 1, стор. 166] та релаксаційні характеристики розроблених зразків трикотажних матеріалів й встановлено вплив на них вище зазначених технологічних параметрів в'язання [26, 27].

Дослідження гігроскопічності. Згідно [28, 29] встановлено гігроскопічність дослідних зразків трикотажних матеріалів. На підставі одержаних результатів досліджень побудовано відповідні графіки (рис. 1 та рис. 2), що описують вплив технологічних параметрів в'язання та рапорту прокладання еластомерної нитки в структуру ґрунту на рівень гігроскопічності розроблених зразків трикотажних матеріалів.



а



б

Рис. 1. Графіки зміни гігроскопічності компресійного трикотажного матеріалу зі зміною швидкості обертання колеса, що подає еластомерну нитку із заданим рапортом її введення у петельну структуру: а – 1+3; б – 1+1

У цілому, слід зазначити, що збільшення швидкості обертання колеса, яке забезпечує введення в структуру ґрунту трикотажного матеріалу еластомерної нитки, призводить до зростання рівня гігроскопічності. Це обумовлено тим, що зменшується натяг еластомерної нитки, а відповідно і щільність структури трикотажного матеріалу. Зростання рихлості петельної структури у свою чергу сприяє поглинанню вологи гідрофільними за своїми властивостями бавовняними волокнами у місцях контакту суміжних петель та точках переплетення ниток.

На рівень гігроскопічності впливає також і рапорт розташування еластомерної нитки. Нижчий рівень гігроскопічності спостерігається у випадку використання рапорту прокладання еластомерної нитки 1+3, що пояснюється формуванням рельєфної поверхні трикотажного матеріалу у вигляді вертикальних валиків. У випадку використання рапорту прокладання 1+1 зі зміщенням формується зерниста менш рельєфна поверхня трикотажного матеріалу, що сприяє рівномірному проникненню пароподібної вологи навколишнього середовища у волокнисту масу бавовняної пряжі, яка є покривною в структурі платированого переплетення.

Найвищого рівня гігроскопічності досягнуто за швидкості обертання колеса, що подає еластомерну нитку 110 об/хв та щільності в'язання по вертикалі 90 петельних рядів у 100 мм трикотажу. У разі використання рапорту 1+3 гігроскопічність складає 8,04%, у разі рапорту 1+1 – 8,9%. Зміна рапорту прокладання з 1+3 на 1+1 сприяє збільшенню гігроскопічності на 10,7%. Найнижчий рівень гігроскопічності спостерігаємо у випадку одержання трикотажного матеріалу з максимальним рівнем компресії за швидкості обертання колеса 50 об/хв та максимальної щільності в'язання по вертикалі 110 пет.р. у 100 мм трикотажу: у разі використання рапорту 1+3 гігроскопічність

складає 7,17%, у разі 1+1 – 6,73%. Це обумовлено тим, що у випадку рапорту 1+3 з еластомерної нитки формується один накид та горизонтальна протяжка, що перетинає 3 пет. стовпчики, а у випадку рапорту 1+1 чергуються один накид та горизонтальна протяжка, що перетинає 1 пет. стовпчик. У наслідок ущільнення петельної структури у разі рапорту 1+1 частка накидів з еластомерної нитки, яка за своєю природою є гідрофобною, на одиницю площі трикотажного матеріалу є більшою. Це у свою чергу призводить до зниження гігроскопічності. Таким чином, зміна рапорту з 1+3 на 1+1 спричиняє зменшення гігроскопічності на 6,1%.

На рис. 2 наведено графіки, які наглядно демонструють вплив щільності в'язання на рівень гігроскопічності компресійного трикотажного матеріалу. Збільшення щільності в'язання трикотажу по вертикалі за умови незмінної швидкості подачі еластомерної нитки у зону в'язання призводить до зниження рівня гігроскопічності, що пояснюється ущільненням петельної структури, а це в свою чергу перешкоджає поглинанню бавовняними волокнами вологи з навколишнього середовища.

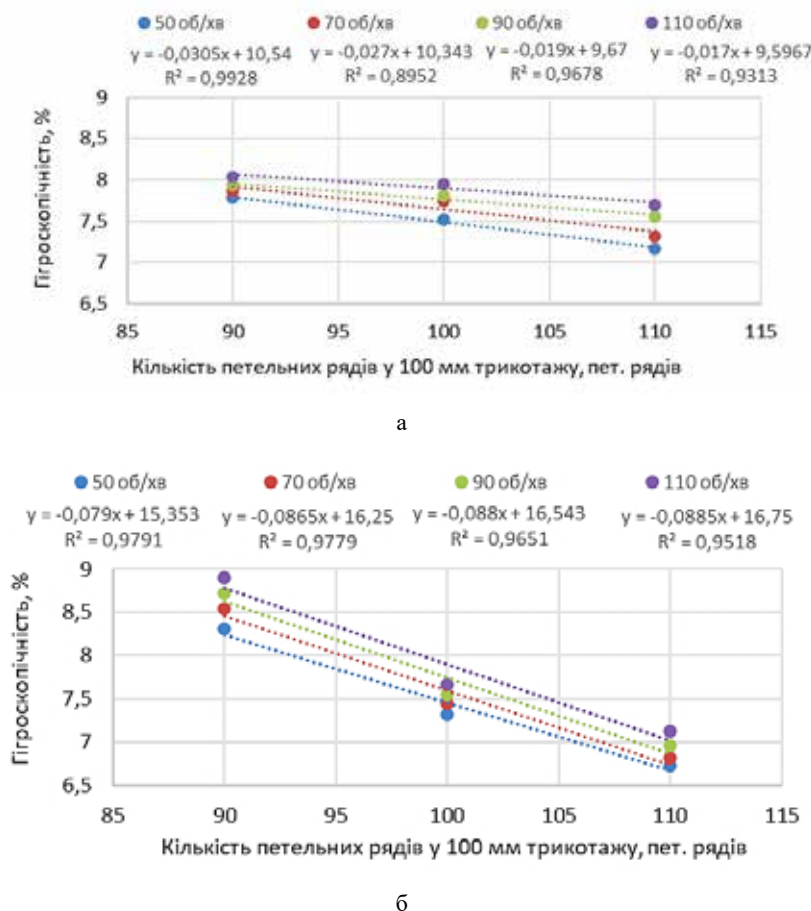
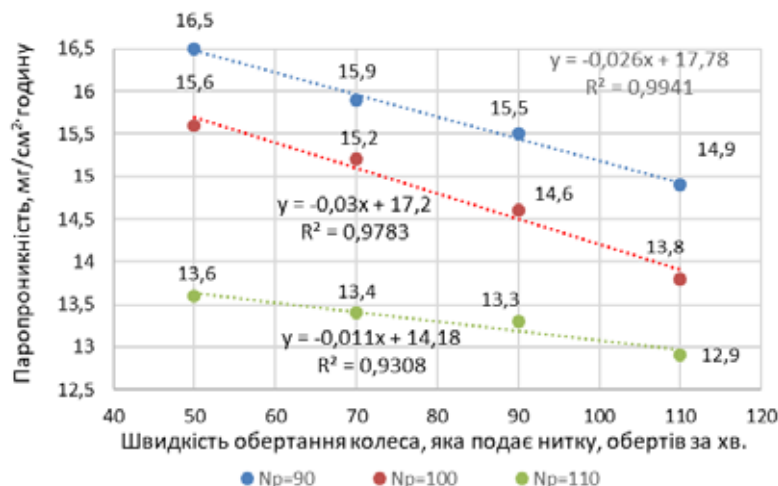


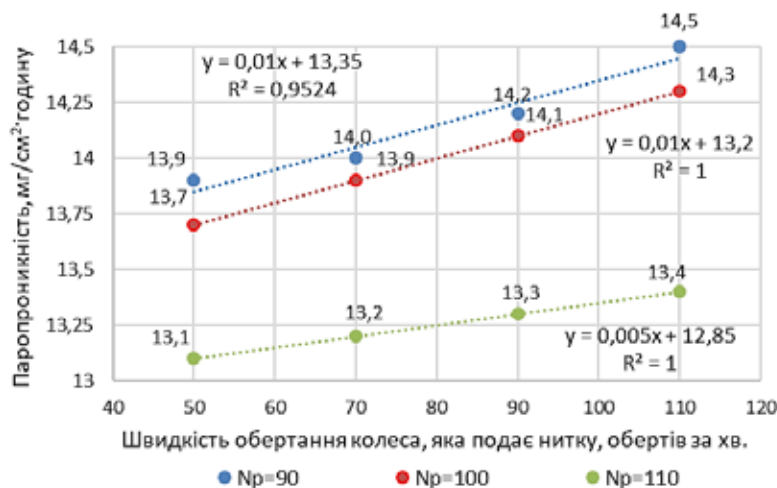
Рис. 2. Графіки зміни гігроскопічності компресійного трикотажного матеріалу зі зміною щільності в'язання ґрунту та заданими швидкістю подачі й рапортом прокладання еластомерної нитки: а – 1+3; б – 1+1

Дослідження паропроникності. Паропроникність дослідних зразків трикотажних матеріалів встановлено згідно [28, 29]. Графіки, наведені на рис. 3 та рис. 4, наглядно ілюструють вплив швидкості подачі еластомерної нитки, рапорту її прокладання та щільності в'язання по вертикалі на рівень паропроникності розроблених зразків компресійних трикотажних матеріалів.

На характер зміни паропроникності впливає рапорт прокладання еластомерної нитки, що пояснюється формуванням рельєфної поверхні у вигляді вертикальних валиків у випадку використання рапорту 1+3, які сприяють проникненню водяної пари. Збільшення швидкості подачі еластомерної нитки призводить до зменшення рівня рельєфності поверхні трикотажного матеріалу та відповідно до зниження рівня паропроникності внаслідок горизонтально розташованих еластомерних ниток у кожному петельному ряді, які перешкоджають проходженню пароподібної вологи крізь петельну структуру.



а



б

Рис. 3. Графіки зміни паропроникності компресійного трикотажного матеріалу зі зміною швидкості обертання колеса, що подає еластомерну нитку із заданим рапортом її введення у петельну структуру: а – 1+3; б – 1+1

Натомість, у випадку використання рапорту 1+1 зменшення швидкості подачі еластомерної нитки призводить до ущільнення структури трикотажного матеріалу, що і є чинником, який перешкоджає проникненню пароподібної вологи.

У випадку використання рапорту 1+3 найвищий рівень паропроникності спостерігаємо за щільності в'язання по вертикалі 90 пет.р. у 100мм трикотажу та швидкості подачі еластомерної нитки 50 об/хв – 16,5 мг/см²·год; у випадку рапорту 1+1 14,5 мг/см²·год – за щільності в'язання по вертикалі 90 пет.р. у 100мм трикотажу та швидкості подачі еластомерної нитки 110 об/хв. Таким чином, шляхом варіювання параметрів в'язання у разі використання рапорту прокладання 1+3 можливо забезпечити вищий рівень паропроникності на 13,8%.

Незалежно від рапорту прокладання еластомерної нитки спостерігається подібний характер впливу щільності в'язання трикотажного матеріалу на зміну паропроникності (рис. 4), а саме: зі збільшенням щільності в'язання по вертикалі рівень паропроникності знижується, що обумовлено зниженням наскрізної пористості трикотажного матеріалу.

Дослідження повітропроникності. Згідно стандартизованої методики [30] на приладі FF-12 визначено повітропроникність дослідних зразків трикотажних матеріалів. Як видно з графіків, наведених на рис. 5, на характер повітропроникності, як і у випадку з паропроникністю, впливає рапорт прокладання еластомерної нитки в структурі трикотажу.

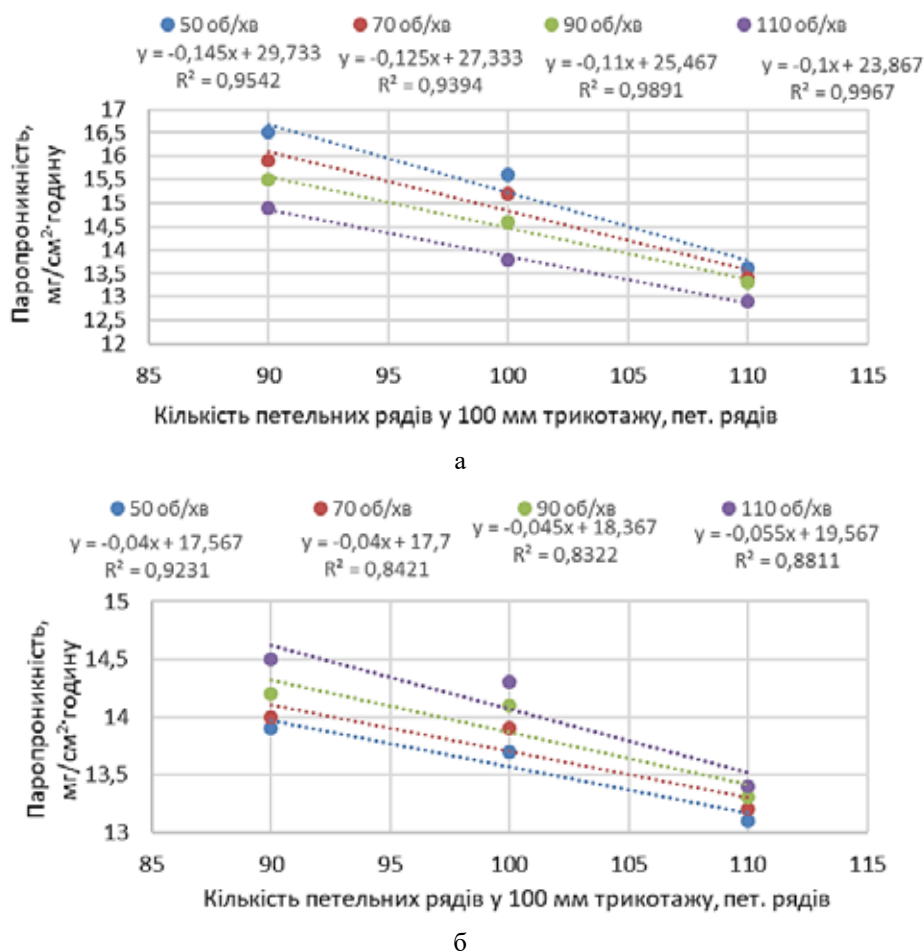


Рис. 4. Графіки зміни паропро проникності компресійного трикотажного матеріалу зі зміною щільності в'язання ґрунту та заданими швидкістю подачі й рапортом прокладання еластомерної нитки: а – 1+3; б – 1+1

Зміна рапорту прокладання призводить до зміни наскрізної пористості, що обумовлено появою у структурі трикотажного матеріалу, з введеною еластомерною ниткою за рапортом 1+3, рельєфної поверхні у вигляді вертикальних валиків. При цьому рівень рельєфності зростає зі зменшенням швидкості подачі еластомерної нитки.

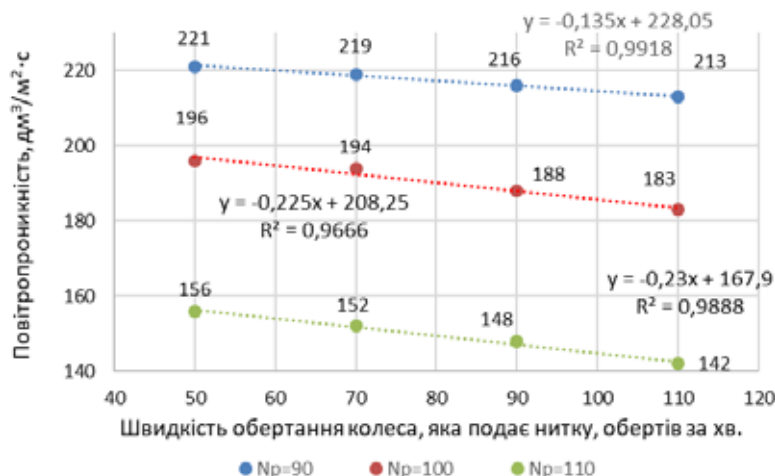
У разі використання рапорту прокладання еластомерної нитки 1+3 найвищого рівня повітропроникності вдається досягти за щільності в'язання 90 пет.р. у 100 мм трикотажу та швидкості обертання колеса, що подає еластомерну нитку у зону в'язання 50 об/хв – $221 \text{ дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; у разі рапорту 1+1 $147 \text{ дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ – за щільності в'язання 110 пет.р. у 100 мм трикотажу та швидкості обертання колеса 110 об/хв.

На характер зміни повітропроникності зі зміною щільності в'язання рапорт прокладання еластомерної нитки не має впливу. Як у випадку рапорту 1+3, так і у випадку 1+1 зі збільшенням щільності в'язання повітропроникність знижується, що пояснюється зменшенням наскрізної пористості трикотажного матеріалу.

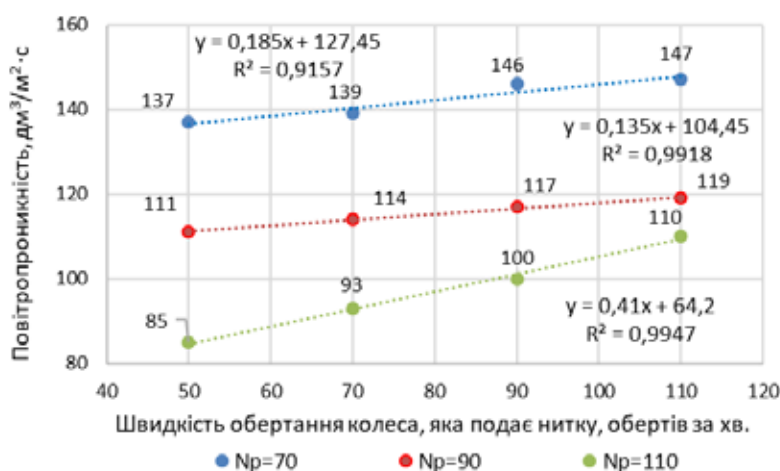
При цьому слід зауважити, що використання рапорту прокладання еластомерної нитки в структуру ґрунту 1+3 дозволяє досягнути вищого рівня повітропроникності на 50%. Це слід брати до уваги під час вибору структури переплетення компресійного трикотажного матеріалу.

Висновки

Широкомасштабне вторгнення росії в Україну призвело до зростання частки українців працездатного віку з травматичною ампутацією як серед військовослужбовців, так і серед цивільного населення. На етапі реабілітації до встановлення протезу використання функціональних чохла для кульг є необхідним компонентом компресійної терапії. Такі вироби виконують дві основні функції: запобігають розвитку набряку та сприяють формуванню оптимальної геометрії кульги, що забезпечує правильне прилягання протеза та рівномірний розподіл навантаження під час експлуатації. Вирішальну роль у формуванні гігієнічних властивостей функціональних трикотажних матеріалів відіграють сировинний склад пряжі та ниток, структура переплетення та технологічні параметри в'язання.



а

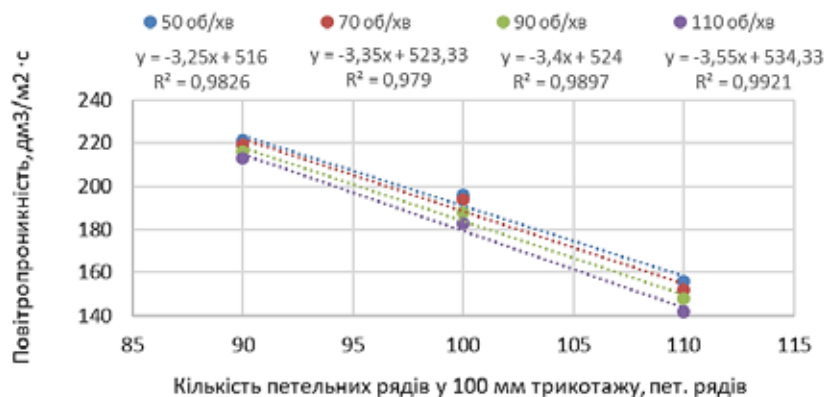


б

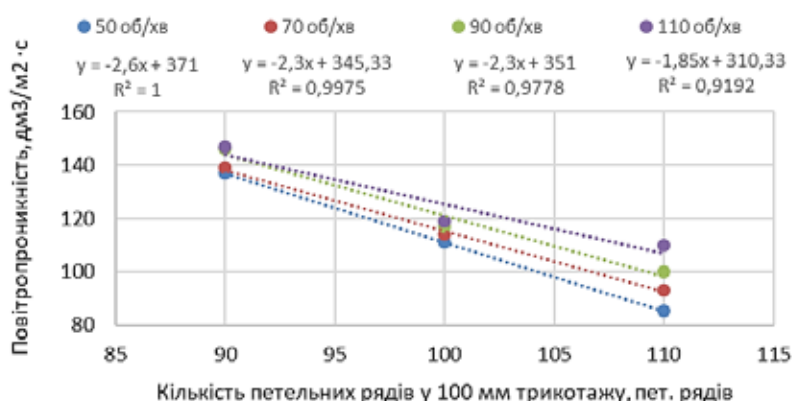
Рис. 5. Графіки зміни повітропроникності компресійного трикотажного матеріалу зі зміною швидкості обертання колеса, що подає еластомерну нитку із заданим рапортом її введення у петельну структуру: а – 1+3; б – 1+1

У ході досліджень виявлено характер впливу рапорту прокладання еластомерної нитки, швидкості її подачі у зону в'язання та щільності в'язання по вертикалі на гігієнічні властивості одержаного компресійного трикотажного матеріалу. Рапорт прокладання еластомерної нитки є суттєвим параметром в'язання, що суттєво впливає на гігієнічні характеристики компресійного трикотажного матеріалу. За умови незмінних параметрів в'язання зміна рапорту прокладання еластомерної нитки з 1+1 на 1+3 дозволяє покращити гігроскопічні властивості, повітро- та паропроникність трикотажного матеріалу. Збільшення натягу еластомерної нитки та щільності в'язання трикотажного матеріалу спричиняє ущільнення структури і відповідно призводить до зниження гігієнічних властивостей трикотажу. Усі ці аспекти впливу слід брати до уваги на етапі проєктування трикотажного матеріалу із заданими гігієнічними властивостями.

За рівнем якості розроблені зразки трикотажних матеріалів відповідають регламентованим показникам гігієнічних властивостей трикотажних полотен для виготовлення натільної білизни [31, 32]. Зокрема, за певних параметрів в'язання гігроскопічність розроблених зразків компресійних трикотажних матеріалів складає не менше 4%, повітропроникність – не менше 135 дм³/м²·с, паропроникність – не менше 5,6 мг/см²·годину. Встановлені кореляційні залежності, що описують вплив обраних параметрів в'язання у заданій у ході досліджень області їх визначення, дозволять проєктувати трикотажні матеріали та вироби трубчастої форми для чохла із заданим рівнем гігроскопічності, повітро- та паропроникності шляхом введення обмежень на область набутих значень того чи іншого досліджуваного показника й пошуку оптимальних рішень.



а



б

Рис. 6. Графіки зміни повітропроникності компресійного трикотажного матеріалу зі зміною щільності в'язання ґрунту та заданими швидкістю подачі й рапортом прокладання еластомерної нитки: а – I+3; б – I+1

Подяка: Дослідження виконано у рамках спільного українсько-литовського науково-дослідного проекту «Функціональні текстильні матеріали та вироби для потреб військових, лікарів, госпітальєрів та цивільного населення (акронім – ORTOKNIT)» (договір №М/57-2024 від 30.04.2024р., номер державної реєстрації № 0124U002685), підтриманого Міністерством освіти і науки України, та за підтримки Міністерства освіти, науки та спорту Литовської Республіки і Науково-дослідної ради Литви.

Список використаної літератури

1. Цема Є. В., Хоменко І. П., Беспаленко А. А., Бур'янов О. А., Мішалов В. Г., Кіх А. Ю. Клініко-статистичне дослідження рівня ампутації кінцівки у поранених. *Клінічна хірургія*. 2017. № 10. С. 51-54. URL: <https://hirurgiya.com.ua/index.php/journal/article/view/261/252> (дата звернення: 11.11.2025).
2. Melnyk L., Halavska L., Mikucioniene D., Dudnyk I., Milasius R. Assortment and Manufacturing Methods of Stump Socks. *Industrial Engineering 2024 – From Zero to Hero* : proceedings of 11th International Young Researchers Conference (Kaunas, Lithuania, 9 May 2024). Kaunas : KTU, 2024. P. 129–131.
3. Mikucioniene D., Halavska L., Melnyk L., Milasius R., Laureckiene G., Arabuli S. Classification, Structure and Construction of Functional Orthopaedic Compression Knits for Medical Application: A Review. *Applied Sciences*. 2024. № 14 (10). 4486. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14114486>.
4. Mikucioniene D., Halavska L., Laureckiene G., Melnyk L., Arabuli S., Milasius R. Development of Knitted Compression Covers for Amputated Limbs: A Review. *Fibers*. 2024. № 12 (10). 80. DOI: <https://doi.org/10.3390/fib12100080>.
5. Ališauskienė D., Mikučionienė D. Prediction of compression of knitted orthopaedic supports by inlay-yarn properties. *Materials science*. 2014. № 20 (3). P. 311-314. URL: <https://matssc.ktu.lt/index.php/MatSc/article/view/4048> (date of access: 11.11.2025).

6. Yu A., Sukigara S., Takeuchi S. Effect of inlaid elastic yarns and inlay pattern on physical properties and compression behaviour of weft-knitted spacer fabric. *Journal of Industrial Textiles*. 2020. № 51. P. 2688S–2708S. DOI: <https://doi.org/10.1177/1528083720947740>.
7. RAL-GZ 387/1:2008. Medizinische Kompressionsstrümpfe – Gütesicherung [Medical Compression Hosiery – Quality Assurance]. Effective from 2008-01-01. Official edition. Bonn, Germany : RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V., 2008. 20 p. URL: http://www.tagungsmanagement.org/icc/images/stories/PDF/ral_gz_387_englisch.pdf (date of access: 11.11.2025).
8. Srdjak M., Skenderi Z., Cubric I. S. Water vapor resistance of knitted fabrics under different environmental conditions. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. 2009. № 73 (2). P. 72-75. URL: https://www.researchgate.net/publication/286982036_Water_Vapour_Resistance_of_Knitted_Fabrics_under_Different_Environmental_Conditions (date of access: 11.11.2025).
9. Islam M. A. Effect of wale wise increasing of tuck and miss loops on bursting strength of single jersey fabric at grey and finish state. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2014. № 3 (2). P. 286-291. DOI: <https://doi.org/10.15623/IJRET.2014.0302051>.
10. Kane C. D., Patil U. J., Sudhakar P. Studies on the influence of knit structure and stitch length on ring and compact yarn single jersey fabric properties. *Textile research journal*. 2007. № 77 (8). P. 572-582. DOI: <https://doi.org/10.1177/0040517507078023>.
11. Liu R., Guo X., Lao T. T., Little T. A critical review on compression textiles for compression therapy: Textile-based compression interventions for chronic venous insufficiency. *Textile research journal*. 2017. № 87 (9). 1121-1141. <https://doi.org/10.1177/00405175166460>.
12. Zhang L., Sun G., Li J., Chen Y., Chen X., Gao W., Hu W. The structure and pressure characteristics of graduated compression stockings: experimental and numerical study. *Textile Research Journal*. 2019. № 89 (23-24). P. 5218-5225. DOI: <https://doi.org/10.1177/0040517519855319>.
13. Bivainytė A., Mikučionienė D. Investigation on the dynamic water absorption of double-layered weft knitted fabrics. *Fibres and textiles in Eastern Europe*. 2011. № 19 (6). P. 64-70. URL: <https://www.researchgate.net/publication/268419679> (date of access: 11.11.2025).
14. Dubrovski P. D. The influence of fabric structure on air permeability. *Proceedings 2nd international Textile, Clothing & Design Conference*. 2004. URL: <https://www.researchgate.net/publication/339641161> (date of access: 11.11.2025).
15. Kundu S. K., Chowdhary U. Comparison of comfort properties of jersey and interlock knits in polyester, cotton/spandex, and polyester/rayon/spandex. *SSRG International Journal of Polymer and Textile Engineering (SSRG-IJPTE)*. 2020. № 7 (1). P. 6–22. DOI: <https://doi.org/10.14445/23942592/IJPTE-V7I1P102>.
16. Uttam D., Mukhopadhyay A., Ishtiaque S. M. Modelling to predict thermophysiological properties of hollow/microporous yarn fabrics. *Journal of the Textile Institute*. 2020. № 104 (4). P. 407-413. DOI: <https://doi.org/10.1080/00405000.2012.737548>.
17. Mikučionienė D., Ciukas R., Mickevičienė A. The influence of knitting structure on mechanical properties of weft knitted fabrics. *Materials Science (MEDŽIAGOTYRA)*. 2010. № 16 (3). P. 221–225. URL: https://www.researchgate.net/publication/266465354_The_Influence_of_Knitting_Structure_on_Mechanical_Properties_of_Weft_Knitted_Fabrics (date of access: 11.11.2025).
18. McCullough E. A., Huang J., Kim C. S. An explanation and discussion of sweating hot plate standards. *Journal of ASTM International*. 2004. № 1 (7). P. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1520/JAI12098>.
19. Havlová, M. (2013). Air permeability and constructional parameters of woven fabrics. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, (2 (98), 84-89. URL: <https://www.researchgate.net/publication/289299913> (date of access: 11.11.2025).
20. Mishra R., Behera B. K., Pal B. P. Novelty of bamboo fabric. *Journal of the Textile Institute*. 2012. № 103 (3). P. 320–329. DOI: <https://doi.org/10.1080/00405000.2011.576467>.
21. Frackiewicz-Kaczmarek J., Psikuta A., Bueno M. A., Rossi R. M. Air gap thickness and contact area in undershirts with various moisture contents: influence of garment fit, fabric structure and fiber composition. *Textile Research Journal*. 2015. № 85 (20). P. 2196-2207. DOI: <https://doi.org/10.1177/0040517514551458>.
22. Marmarali A. B. Dimensional and physical properties of cotton/spandex single jersey fabrics. *Textile Research Journal*. 2003. № 73 (1). P. 11–14. DOI: <https://doi.org/10.1177/004051750307300102>.
23. Oğlakcioğlu N., Marmarali A. Thermal comfort properties of some knitted structures. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 2007. № 15 (5–6). P. 94–96. URL: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3478213> (date of access: 11.11.2025).
24. Çoruh E. Optimization of comfort properties of single jersey knitted fabrics. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 2015. № 23 (4 (112)). P. 66–72. URL: <https://www.researchgate.net/publication/283230662> (date of access: 11.11.2025).

25. Celep G., Yüksekaya M. E. Comparison of thermal comfort properties of single jersey fabrics produced by hollow yarns with different hollowness ratio. *The Journal of The Textile Institute*. 2017. № 108 (2). P. 165-171. DOI: <https://doi.org/10.1080/00405000.2016.1160763>.
26. Галавська Л. Є., Дудник І. О., Арабулі А. Т., Кольчик Д. І. Розробка трикотажного матеріалу чохла для культі та дослідження впливу технологічних факторів процесу в'язання на параметри його структури. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія : Технічні науки*. 2024. № 5 (341). С. 116-122. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-17>
27. Галавська Л., Дудник І., Арабулі А., Кольчик Д. Дослідження впливу технологічних факторів на релаксаційні характеристики трикотажного матеріалу чохла для культі. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 3 (90). С. 163-172. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.21>.
28. ДСТУ ГОСТ 3816:2009 Полотна текстильні. Методи визначення гігроскопічних і водовідштовхувальних властивостей (ISO 811-81 На заміну ГОСТ 3816-81; чинний від 2009-12-01. Втратив чинність 2019-01-01. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 2009.
29. ДСТУ 3672-97. Полотна і вироби трикотажні. Метод визначення паропроникності та вологопоглинання (ГОСТ 30568-98). Чинний від 1999-07-01. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 1999.
30. ДСТУ ISO 9237:2003. Текстиль. Тканини. Визначення повітропроникності (ISO 9237:1995, IDT). 3 Поправкою (ПІС № 10-2004). Чинний від 2024-02-02. Вид. офіц. Київ, 2003. 12 с.
31. ДСТУ 3045-95. Полотна та вироби трикотажні, хутро штучне трикотажне. Класифікація та номенклатура показників якості. На заміну ГОСТ 4.80-82, РД 17-09-028-90 ; чинний від 1996-07-01. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 1995. 26 с. (Національний стандарт України).
32. ДСТУ 3823-98. Полотна трикотажні: Норми та метод оцінки якості Чинний від 2000-01-01. Вид. офіц. Київ, Держстандарт України, 1999.

References

1. Tsema E. V., Khomenko I. P., Bepalenko A. A., Buryanov O. A., Mishalov V. G., & Kikh A. Y. (2017). Kliniko-statystychnе doslidzhennja rivnja amputaciji kincivky u poranenykh [Clinico-Statistical Investigation of the Extremity Amputation Level in Wounded Persons]. *Klin. Khirurhiia*, no. 10, pp. 324–331.
2. Melnyk L., Halavska L., Mikucioniene D., Dudnyk I., & Milasius R. (2024). Assortment and Manufacturing Methods of Stump Socks. Proceedings of the 11th International Young Researchers Conference *Industrial Engineering 2024 – From Zero to Hero* (Kaunas, Lithuania, 9 May 2024). Kaunas : KTU, pp. 129–131.
3. Mikucioniene D., Halavska L., Melnyk L., Milasius R., Laureckiene G., & Arabuli S. (2024). Classification, Structure and Construction of Functional Orthopaedic Compression Knits for Medical Application: A Review. *Applied Scences*, no. 14 (10), 4486. doi: <https://doi.org/10.3390/app14114486>
4. Mikucioniene D., Halavska L., Laureckiene G., Melnyk L., Arabuli S., & Milasius R. (2024). Development of Knitted Compression Covers for Amputated Limbs: A Review. *Fibers*, no. 12(10), 80. doi: <https://doi.org/10.3390/fib1210080>.
5. Ališauskienė D., & Mikučionienė D. (2014). Prediction of compression of knitted orthopaedic supports by inlay-yarn properties. *Materials science*, no. 20 (3), pp. 311-314. Retrieved from <https://matisc.ktu.lt/index.php/MatSc/article/view/4048>
6. Yu A., Sukigara S., & Takeuchi S. (2020). Effect of inlaid elastic yarns and inlay pattern on physical properties and compression behaviour of weft-knitted spacer fabric. *Journal of Industrial Textiles*, no. 51, pp. 2688S–2708S. doi: <https://doi.org/10.1177/1528083720947740>.
7. RAL-GZ 387/1:2008. (2008). Medizinische Kompressionsstrümpfe – Gütesicherung [Medical Compression Hosiery – Quality Assurance]. Effective from 2008-01-01. Official edition. Bonn, Germany : RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V., 20 p. Retrieved from http://www.tagungsmanagement.org/icc/images/stories/PDF/ral_gz_387_englisch.pdf (date of access: 11.11.2025).
8. Srdjak M., Skenderi Z., & Cubric I. S. (2009). Water vapor resistance of knitted fabrics under different environmental conditions. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, no. 73 (2), pp. 72-75. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/286982036_Water_Vapour_Resistance_of_Knitted_Fabrics_under_Different_Environmental_Conditions (date of access: 11.11.2025).
9. Islam M. A. (2014). Effect of wale wise increasing of tuck and miss loops on bursting strength of single jersey fabric at grey and finish state. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, no. 3(2), pp. 286-291. doi: <https://doi.org/10.15623/IJRET.2014.0302051>
10. Kane C. D., Patil U. J., & Sudhakar P. (2007). Studies on the influence of knit structure and stitch length on ring and compact yarn single jersey fabric properties. *Textile research journal*, no. 77(8), pp. 572-582. doi: <https://doi.org/10.1177/0040517507078023>

11. Liu R., Guo X., Lao T. T., & Little T. (2017). A critical review on compression textiles for compression therapy: Textile-based compression interventions for chronic venous insufficiency. *Textile research journal*, no. 87(9), pp. 1121-1141. doi: <https://doi.org/10.1177/00405175166460>
12. Zhang L., Sun G., Li J., Chen Y., Chen X., Gao W., & Hu W. (2019). The structure and pressure characteristics of graduated compression stockings: experimental and numerical study. *Textile Research Journal*, no. 89(23-24), pp. 5218-5225. doi: <https://doi.org/10.1177/0040517519855319>
13. Bivainytė A., & Mikučionienė D. (2011). Investigation on the dynamic water absorption of double-layered weft knitted fabrics. *Fibres and textiles in Eastern Europe*, no. 19(6), pp. 64-70. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/268419679> (date of access: 11.11.2025).
14. Dubrovski P. D. (2004). The influence of fabric structure on air permeability. *Proceedings of the 2nd international Textile, Clothing & Design Conference*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/339641161> (date of access: 11.11.2025).
15. Kundu S. K., & Chowdhary U. (2020). Comparison of comfort properties of jersey and interlock knits in polyester, cotton/spandex, and polyester/rayon/spandex. *SSRG International Journal of Polymer and Textile Engineering (SSRG-IJPE)*, no. 7(1), pp. 6–22. doi: <https://doi.org/10.14445/23942592/IJPE-V7I1P102>
16. Uttam D., Mukhopadhyay A., & Ishtiaque S. M. (2013). Modelling to predict thermophysiological properties of hollow/microporous yarn fabrics. *Journal of the Textile Institute*, no. 104(4), pp. 407-413. doi: <https://doi.org/10.1080/00405000.2012.737548>
17. Mikučionienė D., Ciukas R., & Mickevičienė A. (2010). The influence of knitting structure on mechanical properties of weft knitted fabrics. *Materials Science (MEDŽIAGOTYRA)*, no. 16(3), pp. 221–225. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/266465354> (date of access: 11.11.2025).
18. McCullough E. A., Huang J., & Kim C. S. (2004). An explanation and discussion of sweating hot plate standards. *Journal of ASTM International*, no. 1(7), pp. 1-13. doi: <https://doi.org/10.1520/JAI12098>
19. Havlová, M. (2013). Air permeability and constructional parameters of woven fabrics. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, (2 (98), 84-89. URL: <https://www.researchgate.net/publication/289299913> (date of access: 11.11.2025).
20. Mishra R., Behera B. K., & Pal B. P. (2012). Novelty of bamboo fabric. *Journal of the Textile Institute*, no. 103 (3), pp. 320–329. doi: <https://doi.org/10.1080/00405000.2011.576467>
21. Frackiewicz-Kaczmarek J., Psikuta A., Bueno M. A., & Rossi R. M. (2015). Air gap thickness and contact area in undershirts with various moisture contents: influence of garment fit, fabric structure and fiber composition. *Textile Research Journal*, no. 85(20), pp. 2196-2207. doi: <https://doi.org/10.1177/0040517514551458>
22. Marmarali A. B. (2003). Dimensional and physical properties of cotton/spandex single jersey fabrics. *Textile Research Journal*, no. 73(1), pp. 11–14. doi: <https://doi.org/10.1177/004051750307300102>
23. Oğlakcioğlu N., & Marmarali A. (2007). Thermal comfort properties of some knitted structures. *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, no. 15(5–6), pp. 94–96. Retrieved from <https://www.scrip.org/reference/referencespapers?referenceid=3478213> (date of access: 11.11.2025).
24. Çoruh E. (2015). Optimization of comfort properties of single jersey knitted fabrics. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, no. 23(4 (112)), pp. 6–72. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/283230662> (date of access: 11.11.2025).
25. Celep G., & Yükekaya M. E. (2016). Comparison of thermal comfort properties of single jersey fabrics produced by hollow yarns with different hollowness ratio. *The Journal of The Textile Institute*, no. 108 (2), pp. 165-171. doi: <https://doi.org/10.1080/00405000.2016.1160763>
26. Halavsjka L. Je., Dudnyk I. O., Arabuli A. T., & Koljchik D. I. (2024). Rozrobka trykotazhnogho materialu chokhla dlja kuljti ta doslidzhennja vplyvu tekhnologichnykh faktoriv procesu v'jazannja na parametry jogho struktury [Development of knitted material for a cover for a stump and study of the influence of technological factors of the knitting process on the parameters of its structur]. *Visnyk Khmelnytskyj kogho nacionaljnogho universytetu. Serija : Tekhnichni nauky [Herald of Khmelnytskyi national university. Technical sciences]*, no. 5 (341), pp. 116-122. doi: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-341-5-17>.
27. Halavska L., Dudnik I., Arabuli A., & Kolchik D. (2024). Doslidzhennja vplyvu tekhnologichnykh faktoriv na relaksacijni kharakterystyky trykotazhnogho materialu chokhla dlja kuljti [Investigation of the influence of technological factors on the relaxation characteristics of knitted material for prosthetic sockets]. *Bulletin of Kherson National Technical University*, no. 3 (90), pp. 163–172. doi: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.21>
28. DSTU GOST 3816:2009 Polotna tekstyljni. Metody vyznachennja ghyghroskopychnykh i vodovidshtovkhuvaljnykh vlastyvostej (ISO 811-81). (2009). [State Standard of Ukraine 3816:2009 Textile fabrics. Methods for determining hygroscopic and water-repellent properties (ISO 811-81)]. Replaces GOST 3816-81; effective from 2009-12-01. Expired 2019-01-01. Official publication. Kyiv: State Standard of Ukraine.
29. DSTU 3672-97 Polotna i vyroby trykotazhni. Metod vyznachennja paropronyknosti ta vologhopoghlynnannja (GOST 30568-98). (1999). [State Standard of Ukraine 3672-97 Knitted fabrics and products: Method for determining

vapour permeability and moisture absorption (GOST 30568-98)]. Effective from 1999-07-01. Official publication. Kyiv: State Standard of Ukraine, III, 6 p. (section pagination).

30. DSTU ISO 9237:2003 Tekstylj. Tkanyny. Vyznachennja povitropronyknosti (ISO 9237:1995, IDT). Z Popravkoju (IPS № 10-2004). (2003). [National Standard of Ukraine ISO 9237:2003 Textiles. Fabrics. Determination of air permeability (ISO 9237:1995, IDT). With Amendment (IPS No. 10-2004)]. Effective from 2024-02-02. Official edition. Kyiv, State Standard of Ukraine, 12 p.

31. DSTU 3045-95 Polotna ta vyroby trykotazhni, khutro shtuchne trykotazhne. Kласифікація та номенклатура показників якості. (1995). [National Standard of Ukraine 3045-95 Knitted fabrics and products. Artificial knitted fur. Classification and nomenclature of quality indicators]. Effective from 1995-03-28. Kyiv: State Standard of Ukraine, 26 p.

32. DSTU 3823-98 Polotna trykotazhni. Normy ta metod ocinky якості. (1999). [National Standard of Ukraine 3823-98 Knitted fabrics: Standards and quality assessment method]. Effective from 2000-01-01. Official publication. Kyiv: State Standard of Ukraine, III, 21 p.

Дата першого надходження рукопису до видання: 17.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025

Ю. Ю. ЛУК'ЯНЧЕНКО

студентка кафедри хімічних технологій, експертизи
та безпеки харчової продукції
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0003-6038-8546

В. М. БЕЗПАЛЬЧЕНКО

кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри хімічних технологій, експертизи
та безпеки харчової продукції
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-1355-7938

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

ОЦІНКА ЯКОСТІ БЕЗАЛКОГОЛЬНИХ СОЛОДКИХ ГАЗОВАНИХ НАПОЇВ «ЛИМОНАД» РИНКУ УКРАЇНИ

У статті здійснено всебічну оцінку якості безалкогольних солодких газованих напоїв «Лимонад» трьох українських торгових марок: «Оболонь», «Біола» та «ЗлатаВода». Актуальність дослідження зумовлена стрімким розвитком ринку безалкогольних напоїв в Україні, на якому простежуються чіткі тенденції до зниження вмісту цукру, застосування натуральних інгредієнтів, збільшення асортименту продуктів із функціональними властивостями та підвищення вимог до якості й безпечності. У контексті таких змін аналіз рецептури та властивостей популярних газованих напоїв дозволяє оцінити відповідність продукції сучасним стандартам та очікуванням споживачів.

Порівняльний аналіз складу досліджуваних лимонадів виявив суттєві відмінності у застосуванні підсолоджувачів і допоміжних інгредієнтів. Напій ТМ «Оболонь» містить глюкозно-фруктозний сироп, ацесульфам К та сукралозу, що забезпечує збалансований солодкий смак. ТМ «Біола» поєднує глюкозно-фруктозний сироп, цукор і сахарин, а також додаткові цитрусові ароматизатори. Напій ТМ «ЗлатаВода» виготовлений без додавання цукру, підсолоджується аспартамом і сахарином та містить 1 % сокової основи з яблучного концентрату. Встановлено чітку залежність між видом підсолоджувача та калорійністю продукту: повна або часткова заміна цукру на синтетичні підсолоджувачі суттєво знижує енергетичну цінність напою.

Органолептичні та фізико-хімічні показники оцінювалися згідно з вимогами ДСТУ 4069:2016. Усі досліджувані зразки відповідали стандартам за прозорістю, кольором, відсутністю візуальних дефектів, смаком, ароматом, масовою часткою сухих речовин і кислотністю. Проведений сенсорний аналіз визначив найвищу комплексну оцінку для напою ТМ «Оболонь», децю нижчу – для ТМ «Біола». Напій ТМ «ЗлатаВода» отримав найменшу кількість балів через надмірну солодкість і характерний «штучний» післясмак, що зумовлений використанням синтетичних підсолоджувачів. Проте цей зразок може бути рекомендований споживачам, яким необхідно обмежити споживання цукру.

Результати роботи підтверджують відповідність досліджених напоїв нормативним вимогам і демонструють вплив рецептурних особливостей на якість та сенсорні характеристики продукції.

Ключові слова: якість, безалкогольні солодкі газовані напої, органолептичні та фізико-хімічні методи аналізу.

YU. YU. LUKYANCHENKO

Student at the Department of Chemical Technologies, Expertise
and Food Safety
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0003-6038-8545

V. M. BEZPALCHENKO

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor,
Assistant Professor at the Department of Chemical Technologies, Expertise
and Food Safety
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-1355-7938

O. YA. SEMESKO

Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher,
Professor at the Department of Chemical Technologies, Expertise
and Food Safety
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-8309-5273

QUALITY ASSESSMENT OF NON-ALCOHOLIC SWEET CARBONATED BEVERAGES «LEMONADE» ON THE UKRAINIAN MARKET

The article presents a comprehensive assessment of the quality of non-alcoholic sweet carbonated beverages marketed as “Lemonade” produced by three Ukrainian brands: Obolon, Biola, and ZlataVoda. The relevance of this study is driven by the rapid expansion of the non-alcoholic beverage market in Ukraine, which is characterized by clear trends toward sugar reduction, the use of natural ingredients, the development of products with functional properties, and increasingly stringent quality and safety requirements. In the context of these transformations, the analysis of formulations and product properties of popular carbonated beverages makes it possible to evaluate their compliance with modern standards and consumer expectations.

A comparative analysis of the compositions of the examined lemonades revealed significant differences in the use of sweeteners and auxiliary ingredients. The beverage produced by Obolon contains glucose–fructose syrup, acesulfame K, and sucralose, providing a balanced sweet taste. Biola combines glucose–fructose syrup, sugar, and saccharin, along with additional citrus flavourings. ZlataVoda is manufactured without added sugar; sweetened with aspartame and saccharin, and contains 1% juice base derived from apple concentrate. A clear relationship was established between the type of sweetener and the caloric content of the product: full or partial replacement of sugar with synthetic sweeteners significantly reduces the beverage’s energy value.

Organoleptic and physicochemical parameters were evaluated in accordance with DSTU 4069:2016. All examined samples complied with the standard requirements with respect to clarity, colour, absence of visible defects, taste, aroma, total soluble solids, and acidity. Sensory analysis revealed the highest overall score for the Obolon sample, with a slightly lower score for Biola. The ZlataVoda beverage received the lowest rating due to excessive sweetness and a pronounced “artificial” aftertaste resulting from the use of synthetic sweeteners. However, this sample may be recommended for consumers who need to limit sugar intake.

The results confirm that all examined beverages meet regulatory requirements and demonstrate the influence of formulation components on product quality and sensory characteristics.

Key words: quality, non-alcoholic sweet carbonated beverages, organoleptic and physicochemical analysis methods.

Постановка проблеми

Сегмент безалкогольних напоїв в Україні на сьогодні відзначається як один із найбільш об’ємних та таких, що динамічно розвивається у галузі харчової промисловості. За даними найбільшої української мережі супермаркетів «АТБ -маркет» минулого року споживачів найбільше цікавили вода, газовані солодкі напої, соки, енергетичні напої та холодні чаї. Основна доля продажів припадає на базові продукти: вода та солодкі газовані напої [1, 2]. Проте найбільшу динаміку продажів показують напої з напрямку «здорового харчування»: ферментовані напої по типу Комбуча, напої з низьким додаванням цукру, без цукру та штучних барвників, напої з протеїном (хоча доля в загальних продажах залишається малою). Враховуючи воєнний стан в державі, безалкогольні енергетики показувати високу динаміку росту у порівнянні з довоєнних періодом. Безумовним лідером в продажах залишаються газовані солодкі напої. У трендах 2024-2025 рр. – напої «Bubble drink» (з додаванням жувальних кульок); соковмісні – газовані напої з додаванням натурального соку; а також напої з низьким вмістом цукру. Газовані солодкі безалкогольні напої – це популярна група напоїв серед споживачів різних вікових категорій, тому до якості інгредієнтів встановлюються суворі вимоги, зокрема, не тільки відсутність шкідливих домішок, а й відповідність нормативній документації і наявність сертифікатів якості та безпечності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одним із ключових факторів, що формує асортимент сучасного ринку безалкогольних напоїв, є зростаючий попит на здорове харчування. Споживачі шукають продукти з низьким вмістом цукру, без штучних добавок, а також напої, які мають додаткові корисні властивості, такі як зміцнення імунітету або покращення когнітивних функцій. У галузі виробництва безалкогольних напоїв на сьогоднішній день ключовими інноваціями

та нові продуктами є виробництво напоїв зі зниженим вмістом цукру та, відповідно, калорійністю, функціональних напоїв з адаптогенами (наприклад, ашваганда, родіола), напоїв з рослинними альтернативами молока (горіхове молоко, кокосова вода) [3]. Тренди на екологічність впливають на упаковку та виробничі процеси. Використання біорозкладних матеріалів та екологічно чистих технологій стало важливою конкурентною перевагою. Нові законодавчі акти та регуляторні вимоги також суттєво впливають на формування асортименту. Наприклад, введення обмежень на використання певних консервантів або підсолоджувачів стимулює виробників до інновацій у сфері натуральних інгредієнтів [4, 5]. В роботах [6, 7, 8] розглянуті напрями інноваційного розвитку галузі безалкогольних напоїв, зокрема, створення напоїв з можливістю індивідуального підбору складу, розширення сегменту напоїв без цукру або зі зниженим вмістом цукру; виробництво напоїв із застосуванням натуральних барвників, ароматизаторів та консервантів; напоїв на рослинній основі (веганські напої, горіхове молоко, ферментовані рослинні продукти). Перспективний напрям на виробництво безалкогольних напоїв функціонального призначення, зокрема, для лікування розладів нирок та вірусних інфекцій, остеоартриту, гіпертонії, імуномодуючих і протидіабетичних, протимікробних засобів [9]. В роботі [10] запропонована рецептура безалкогольного напою «Тонік – особливий» з різним співвідношенням плодово-ягідних соків та рослинної сировини: полинь, чорниця, деревій звичайний, лимони. Технологія напою з екстрактом ехінацеї підвищує стабільність і антиоксидантну активність його біоактивних сполук у кислому харчовому напої протягом 30 днів зберігання [11]. Сучасний ринок безалкогольних напоїв активно розвивається під впливом споживчих запитів, економічних та нормативних факторів, пропонуючи широкі можливості для інновацій та розвитку асортименту.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи було провести оцінку якості безалкогольного солодкого газованого напою «Лимонад» різних торгових марок.

Викладення основного матеріалу дослідження

Як об'єкт дослідження у роботі обрано 3 зразки безалкогольних солодких газованих напоїв «Лимонад» у поліетиленових пляшках виробництва вітчизняних торгових марок, а саме: «Оболонь», «Біола» та «ЗлатаВода». Контроль якості виробництва газованих напоїв передбачає суворий контроль якості на кожній стадії і здійснюється регулярно відповідно до нормативних документів (ДСТУ, ТУ, ISO). Застосовуються лабораторні методи аналізу, такі як спектрофотометрія, хроматографія, мікробіологічні посіви. Основні дефекти газованих солодких безалкогольних напоїв, причини їх виникнення та заходи попередження наведені в табл. 1 [12].

Таблиця 1

Дефекти безалкогольних солодких газованих напоїв

Дефект	Причини появи дефекту	Заходи попередження
Втрата насиченості вуглекислим газом («вивітрювання»)	Недостатній тиск під час карбонізації. Погана герметичність упаковки. Неправильне зберігання продукції (висока температура).	Дотримання режимів карбонізації з тиском 3–5 атм. Регулярний контроль герметичності тари. Забезпечення правильних умов зберігання та транспортування (температура не вище 20 °С).
Зміна смаку та поява стороннього присмаку	Використання неякісної сировини (особливо води або ароматизаторів). Порушення технології приготування сиропу (неправильне дозування компонентів). Використання тари низької якості, яка може взаємодіяти з напоєм.	Використання тільки сертифікованої, якісної сировини. Контроль дозування компонентів на етапі приготування сиропу. Використання інертних матеріалів для пакування, які не вступають у взаємодію з продуктом
Помутніння напою	Недостатня очистка води або сиропу. Взаємодія компонентів напою (нестійкі ароматизатори чи барвники). Розвиток мікробіологічних процесів у продукті.	Впровадження багатоступеневої очистки води та сиропів. Використання стабільних, добре сумісних інгредієнтів. Дотримання санітарних норм і контроль стерильності обладнання.
Мікробіологічне псування (бродіння, пліснявіння)	Недостатня обробка тари перед наповненням. Низький рівень санітарії у виробничому процесі. Використання інгредієнтів, заражених мікроорганізмами.	Проведення ретельної санітарної обробки тари та обладнання. Використання консервантів у допустимих нормах. Регулярний мікробіологічний контроль на етапах виробництва.
Осад у пляшці	Використання неякісних або нестабільних інгредієнтів (наприклад, концентрати, соки, ароматизатори). Недостатня фільтрація готового напою.	Ретельна фільтрація напою перед розливом. Використання стабілізаторів та якісних інгредієнтів із підтвердженою стабільністю.
Зміна кольору напою	Використання барвників, нестійких до світла чи кисню. Порушення умов зберігання (світло, температура). Взаємодія барвників з компонентами напою або тарою.	Вибір барвників з високою стійкістю. Використання упаковки, яка забезпечує захист від світла та повітря. Дотримання умов зберігання (температура).

Згідно даних таблиці 2 зразки напоїв, хоча і мають однакову назву, дещо відрізняються рецептурою. Спільними інгредієнтами у рецептурах є вода, регулятор кислотності лимонна кислота, ароматизатор «Лимонад», барвник цукровий колер, консервант бензоат натрію та діоксид вуглецю.

Таблиця 2

Склад досліджуваних безалкогольних солодких газованих напоїв «Лимонад»

«Оболонь»	«Біола»	«ЗлатаВода»
Вода, глюкозно-фруктозний сироп з цукром або цукор, регулятор кислотності лимонна кислота, ароматизатор «Лимонад», консервант бензоат натрію, антиоксидант аскорбінова кислота, барвник харчовий «Цукровий колер», підсолоджувачі «Ацесульфам К», «Сукралоза»	Вода питна підготовлена, глюкозно-фруктозний сироп, цукор, діоксид вуглецю, сахарин, регулятор кислотності лимонна кислота, харчовий барвник E150d, ароматизатор «Лимонад», ароматизатор «Екстра Ситро», натуральний ароматизатор «Апельсин», консервант бензоат натрію	Вода питна, діоксид вуглецю, сік основа 1% (концентрат яблучного соку, консервант бензоат натрію), регулятор кислотності лимонна кислота, ароматизатор «Лимонад», підсолоджувачі (аспартам, сахарин), консервант бензоат натрію, натуральний барвник цукровий колер

Солодкий смак напою торгової марки «Біола» забезпечується додаванням глюкозно-фруктозного сиропу та підсолоджувача сахарину, «Оболонь» – глюкозно-фруктозного сиропу та суміші підсолоджувачів ацесульфаму К та сукралози. При цьому лимонад «ЗлатаВода» виготовлений без додавання цукру лише з використанням підсолоджувачів аспартаму та сахарину. Відомо, що цукрозамінники додають до газованих напоїв з метою зниження їх калорійності. Серед представлених напоїв спостерігається залежність між присутністю цукру та синтетичних підсолоджувачів у складі та калорійністю напоїв (рис. 1).

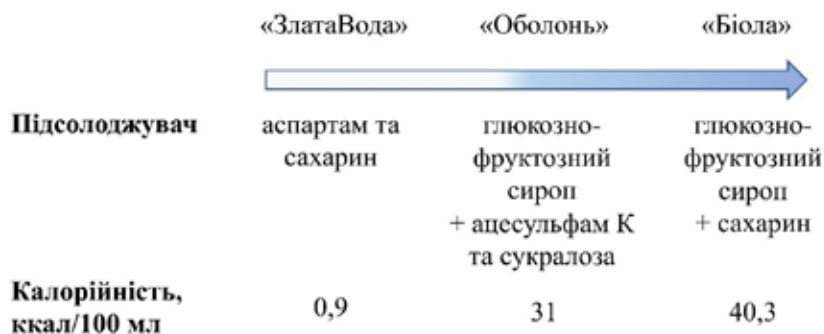


Рис. 1. Вплив типу підсолоджуючого агента на калорійність напоїв

За хімічною будовою ацесульфам К, сукралоза, аспартам та сахарин – це синтетичні речовини нецукрової природи, які в сотні разів є солодшими від цукру. Крім того вони мають нульову поживну цінність. Тому їх широко використовуються в газованих напоях для зменшення калорійності без втрати солодкого смаку. Проте застосування вказаних речовин викликає дискусії щодо потенційного впливу на здоров'я, смакові властивості й метаболізм [13]. Аспартам має найближчий до цукру, м'який смак. Сукралоза хоча і характеризується чистим, без гіркоти смаком, але може залишати штучний присмак. Ацесульфам К має солодкий з гірчинкою смак, тому він часто комбінується з іншими підсолоджувачами. Сахарин є дуже солодким на смак, але його металевий присмак часто вважається споживачами неприємним. Всі згадані синтетичні підсолоджувачі є дозволеними харчовими добавками в Україні, але існують дослідження про те що, вони все ж таки впливають на мікробіом та секрецію інсуліну. Крім того, аспартам не рекомендовано до вживання людям, хворим на фенілкетонурію. Таким чином, додавання штучних цукрозамінників або й повна заміна ними цукру у складі напою призводить не лише до зниження його калорійності, а й зміни смаку, адже багато споживачів повідомляють про «штучний» присмак у напоях з підсолоджувачами. Крім того, вказані харчові добавки потенційно можуть викликати зміни у кишковому мікробіомі та інсулінову чутливість та бути небезпечними для певних груп людей (фенілкетонурія) [14].

Крім різних підсолоджуючих агентів, рецептури досліджуваних напоїв мають наступні відмінності. Лимонад «Оболонь» містить у складі аскорбінову кислоту як антиоксидант. Напій «Біола» – додатково містить ароматизатор «Екстра Ситро» та натуральний ароматизатор «Апельсин», що впливатиме на смак на аромат лимонаду. До складу напою «ЗлатаВода» включено сік основу 1%, який в свою чергу складається з концентрату яблучного соку та консерванту бензоату натрію, що також буде відображатись на смако-ароматичному профілі напою.

Результати дослідження органолептичних показників безалкогольних солодких газованих напоїв за ДСТУ 4069:2016 наведені у табл. 3 [15].

Таблиця 3

Органолептичні показники зразків безалкогольних солодких газованих напоїв

Зразок	Зовнішній вигляд	Смак і аромат	Колір
ДСТУ 4069:2016.0	Прозора рідина без осаду і сторонніх включень. Допустима опалесценція, обумовлена особливостями зернової та плодово-ягідної сировини.	Обумовлені особливостями використаної сировини.	Обумовлений особливостями використаної сировини.
ТМ «Оболонь»	Відповідає	Відповідає	Відповідає
ТМ «Біола»	Відповідає	Відповідає	Відповідає
ТМ «ЗлатаВода»	Відповідає	Відповідає	Відповідає

Отже, результати органолептичної оцінки якості досліджуваних зразків безалкогольних солодких газованих напоїв за ДСТУ показують, що всі зразки відповідають встановленим у стандарті вимогам. Оскільки напої все ж відрізнялись за своїми сенсорними характеристиками, далі було здійснено їх органолептичний аналіз за розробленою 5-бальною шкалою оцінки.

Результати оцінювання якості зразків безалкогольних солодких газованих напоїв у вигляді сенсорної діаграми представлено на рис. 2.

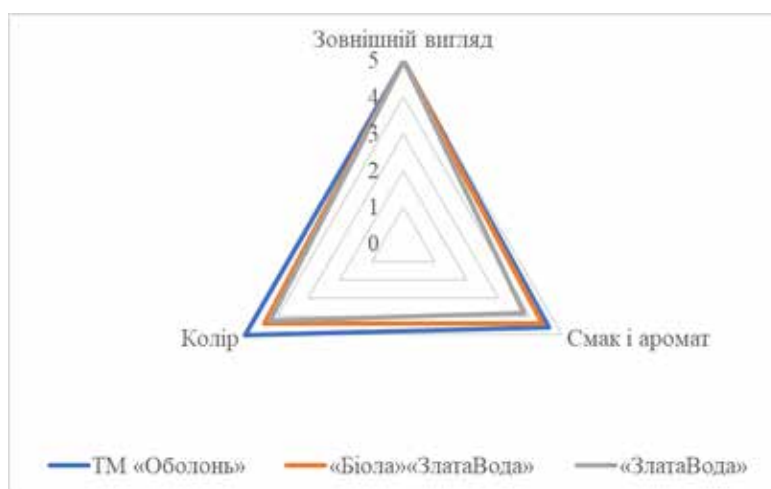


Рис. 2. Сенсорна діаграма зразків безалкогольних солодких газованих напоїв

Оцінка зразків безалкогольних солодких газованих напоїв за комплексними показниками якості:

$$K_{\text{«Оболонь»}} = 0,2 \frac{5}{5} + 0,5 \frac{4,6}{5} + 0,3 \frac{5}{5} = 0,960 \text{ – «відмінно»}.$$

$$K_{\text{«Біола»}} = 0,2 \frac{5}{5} + 0,5 \frac{4,4}{5} + 0,3 \frac{4,4}{5} = 0,904 \text{ – «відмінно»}.$$

$$K_{\text{«ЗлатаВода»}} = 0,2 \frac{5}{5} + 0,5 \frac{3,8}{5} + 0,3 \frac{4,2}{5} = 0,832 \text{ – «добре»}.$$

Оцінювання обраних напоїв за запропонованою бальною оцінкою за сенсорною діаграмою та комплексними показниками якості свідчить, що найвищу оцінку має зразок напою ТМ «Оболонь» – 0,960 «відмінно». Менше балів набрав зразок ТМ «Біола» – 0,904 через дещо інтенсивні аромат та кислий смак. Найменшу кількість балів набрав зразок напою виробництва ТМ «ЗлатаВода» – 0,832 «добре». Цей зразок характеризувався дуже солодким приторним смаком та «штучним» післясмаком, характерним для синтетичних підсолоджувачів. Але слід зазначити, що цей напій може стати альтернативою для людей з порушенням інсулінового обміну.

Результати дослідження фізико-хімічних показників якості безалкогольних солодких газованих напоїв наведені у табл. 4.

Таблиця 4

Фізико-хімічні показники якості безалкогольних солодких газованих напоїв

Назва показника	Вимога ДСТУ	ТМ «Оболонь»	ТМ «Біола»	ТМ «ЗлатаВода»
Масова частка сухих речовин, %	від 0 до 20,0 включно	7,2	9,8	1,2
Кислотність, см ³ , 1 моль/дм ³ розчину гідроксиду натрію на 100 см ³ напою	від 1,0 до 15,0	12,0	15,0	12,5

Отримані дані вказують на те, що найбільша кількість сухих речовин міститься у напої «Оболонь», що можна пояснити використанням у складі напою значної кількості глюкозно-фруктозного сиропу для забезпечення солодкого смаку. Лимонад «Біола» містить менше сухих речовин, оскільки частина глюкозно-фруктозного сиропу у рецептурі замінена на синтетичні підсолоджувачі. Найменшою масовою часткою сухих речовин характеризуються напій «ЗлатаВода», оскільки не містить глюкозно-фруктозного сиропу, а лише концентрат яблучного соку.

Показник кислотності досліджуваних безалкогольних солодких газованих напоїв вказує, що кислотність напоїв «Оболонь» та «ЗлатаВода» приблизно однакова, лимонад «Біола» має дещо вищий показник.

Слід відмітити, що за показниками масової частки сухих речовин і кислотності досліджувані напої відповідають вимогам ДСТУ 4069:2016.0.

Висновки

Проаналізувавши склад зразків безалкогольних солодких газованих напоїв «Лимонад» виробництва вітчизняних торгових марок, встановлено, що солодкий смак напою «Біола» забезпечується додаванням глюкозно-фруктозного сиропу, «Оболонь» – глюкозно-фруктозного сиропу та ацесульфаму К та сукралози, «ЗлатаВода» – лише аспартаму та сахарину. Виявлено, що калорійність зменшується з частковою або повною заміною цукру на синтетичні підсолоджувачі.

Встановлено, що досліджувані напої відповідають вимогам ДСТУ 4069:2016 за органолептичними показниками зовнішнього вигляду, смаку і аромату, кольору й фізико-хімічними показниками якості, а саме масова частка сухих речовин і кислотність.

За сенсорним аналізом напоїв встановлено, що найвищу оцінку має зразок напою ТМ «Оболонь» – 0,960 «відмінно». Менше балів набрав зразок ТМ «Біола» – 0,904 через дещо інтенсивні аромат та кислий смак. Найменшу кількість балів набрав зразок напою виробництва ТМ «ЗлатаВода» – 0,832 «добре».

Напій ТМ «ЗлатаВода» рекомендовано для людей з порушенням інсулінового обміну завдяки відсутності цукру у складі, не зважаючи на наявність дуже солодкого приторного смаку та «штучного» післясмаку, характерного для синтетичних підсолоджувачів.

Список використаної літератури

1. Тищенко В.І., Божко Н.В. Аналіз сучасних трендів у виробництві безалкогольних напоїв із використанням нетрадиційної рослинної сировини. *Таврійський науковий вісник. Серія «Технічні науки»*. 2023. № 1. С. 114–124. <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2023.1.12>
2. Гребельник О.П., Пруська Н.В., Волохатюк А.О. Аналіз ринку лимонаду в Україні. Молодь – аграрній науці і виробництву: Новітні технології виробництва та переробки продукції тваринництва, харчові технології: матеріали Всеукраїнської наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти. (Біла Церква, 24 квітня 2024 р.). Біла Церква, БНАУ, 2024. С. 57–59. https://science.btsau.edu.ua/sites/default/files/tezy/tezy_stud_btf_24.04.24.pdf
3. Домарецький В.А., Прибильський В.Л., Михайлов М.Г. Технологія екстрактів, концентратів і напоїв із рослинної сировини. Вінниця: Нова книга, 2005. 408 с.
4. Богуславська А.А., Язвінська Н.В. Тенденції ринку напоїв в світі та України: виклики, можливості та роль антикрихкості маркетингу ПРАТ «Карлсберг Україна. Розвиток підприємництва як фактор зростання національної економіки: матеріали XXIII Міжнародної наук.-практ. конф. (Київ, КПІ, 20 листопада 2024 р.). Київ: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2024. С. 29-30. URL: <https://conf-keip.kpi.ua/> (дата звернення: 16.11.2025).
5. Андрущенко В.О. Вивчення попиту на безалкогольні газовані напої. Формування механізмів управління якістю та підвищення конкурентно-спроможності підприємств: тези доповідей XV Міжнародної наук.-практ. інтернет-конф. Дніпро, 3.04.2024. – Дніпро: Університет ім. А. Нобеля. 2024. С. 22-23. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi78/0058154.pdf>. (дата звернення: 16.11.2025).
6. No-alcohol share of overall alcohol market expected to grow to nearly 4% by 2027. 18.12.2023. URL: <https://www.theiwsr.com/insight/no-alcohol-share-of-overall-alcohol-market-expected-to-grow-to-nearly-4-by-2027/> (дата звернення: 16.11.2025).
7. Романова З.М., Косоголова Л.О., Арутюнян Т.В. Особливості технології безалкогольних напоїв з використанням дикорослої ягідної сировини. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2015. № 1. С. 85–91. <https://er.kai.edu.ua/server/api/core/bitstreams/7e312f68-5766-4c0f-921c-f02c1acee420/content>
8. Бондарчук З.В., Куриленко Ю.М., Андронович Г.М. Використання рослинної сировини як комплекс біологічно активних речовин для напоїв функціонального призначення. *Інновації та технології в сфері послуг і харчування*. 2022. № 2(6). С. 38–43. DOI: [https://doi.org/10.32782/2708-4949.2\(6\).2022.7](https://doi.org/10.32782/2708-4949.2(6).2022.7).
9. Maleš I. The medicinal and aromatic plants as ingredients in functional beverage production / I. Maleš, S. Pedisić, Z. Zorić, I. Elez-Garofulić, M. Repajić, L. You, V. Dragović-Uzelac // *Journal of Functional Foods*. 2022. Vol. 96. P. 105210. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2022.105210>.
10. Довженко І.С. Удосконалення технології безалкогольних напоїв з використанням нетрадиційної сировини. Інтеграційні та інноваційні напрями розвитку харчової індустрії / І.С. Довженко, О.Л. Чепурна: матеріали четвер-

тої міжнародної наук.-практ. конф. «Інтеграційні та інноваційні напрями розвитку харчової індустрії», Черкаси, 5.11.2020. Черкаси: ФОП Гордієнко Є.І. 2020. Т.1. С. 39–40. URL: <https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/1904/1/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D1%96%D1%97%204.pdf> (дата звернення: 16.11.2025).

11. Molaveisi M. Fate of nano-phytosomes containing bioactive compounds of Echinacea extract in an acidic food beverage / M. Molaveisi, M.S. Noghabi, K. Parastouei, R.A. Taheri // *Food Structure*. 2021. № 27(5). P. 100177. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2021.100177>.

12. Салєба Л.В., Єщенко К.О. Ідентифікаційна експертиза безалкогольних напоїв. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2019. № 2 (69). С. 126–133. <https://files.core.ac.uk/download/pdf/287189272.pdf>.

13. Воробйова В.І. Технічний аналіз харчових добавок та косметичних продуктів / В.І. Воробйова, О.Е. Чигиринець, Т.М. Пилипенко, Л.А. Хрокало, В.Г. Єфімова. Київ: КІП ім. Ігоря Сікорського, 2020. 345 с.

14. Олійніченко Я.О. Вплив комплексу харчових добавок на процеси ремоделювання структурних компонентів тонкого кишечника, як важлива медико-соціальна проблема сучасного стану забезпечення громадського здоров'я населення України / Я.О. Олійніченко, С.М. Білаш, О.М. Проніна, М.М. Коптев, М.О. Олійніченко, О.В. Безега, Я.В. Коваль // *Вісник проблем біології і медицини*. 2021. Вип.3 (161). С. 65–70. <http://dx.doi.org/10.29254/2077-4214-2021-3-161-65-70>.

15. ДСТУ 4069:2016 «Напої безалкогольні. Загальні технічні умови». Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 16 с.

References

1. Tyshchenko, V.I., Bozhko, N.V. (2023). Analiz suchasnykh trendiv u vyrobnytstvi bezalkohol'nykh napoyiv iz vykorystanniam netradytsiynoyi roslynnoyi syrovyny [Analysis of modern trends in the production of soft drinks using non-traditional plant raw materials]. *Tavriys'kyi naukovyy visnyk. Seriya «Tekhnichni nauky» [Tavria Scientific Bulletin. Series «Technical Sciences»]*, 1, 114–124 [in Ukrainian].

2. Hrebel'nyk, O.P., Prus'ka, N.V., Volokhatyuk, A.O. (2024). Analiz rynku lymonadu v Ukrayini [Analysis of the lemonade market in Ukraine]. All-Ukrainian scientific-practical conference of higher education applicants «Youth – agricultural science and production: Latest technologies for production and processing of livestock products, food technologies», Bila Tserkva, BNAU, P. 57–59 [in Ukrainian].

3. Domarets'kyi, V.A., Prybyl's'kyi, V.L., Mykhaylov, M.H. (2005). Tekhnolohiya ekstraktiv, kontsentrativ i napoyiv iz roslynnoyi syrovyny [Technology of extracts, concentrates and beverages from plant raw materials]. Vinnytsya: Nova knyha [in Ukrainian].

4. Bohuslavs'ka, A.A., Yazvins'ka, N.V. (2024). Tendentsiyi rynku napoyiv v sviti ta Ukrayiny: vyklyky, mozhlyvosti ta rol' antykraykhosti marketynhu PRAT «Karlsberh Ukrayina. Rozvytok pidpryyemnytstva yak faktor zrostannya natsional'noyi ekonomiky [Trends in the beverage market in the world and Ukraine: challenges, opportunities and the role of antifragility of marketing of PRJSC «Carlsberg Ukraine». XXIII International Scientific-Practical Conf. Kyiv, KPIU. URL: <https://conf-keip.kpi.ua/> (access date: 16.11.2025) [in Ukrainian].

5. Andryushchenko, V.O. (2024). Vyvchennya popytu na bezalkohol'ni hazovani napoyi. Formuvannya mekhanizmiv upravlinnya yakystyu ta pidvyshchennya konkurentno-spromozhnosti pidpryyemstv [Study of demand for non-alcoholic carbonated drinks. Formation of quality management mechanisms and increasing the competitiveness of enterprises]. XV International Scientific-Practical Internet Conference. Dnipro. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi78/0058154.pdf>. (access date: 16.11.2025) [in Ukrainian].

6. No-alcohol share of overall alcohol market expected to grow to nearly 4% by 2027. 18.12.2023. URL: <https://www.theiwsr.com/insight/no-alcohol-share-of-overall-alcohol-market-expected-to-grow-to-nearly-4-by-2027/> (access date: 16.11.2025).

7. Romanova, Z.M., Kosoholova, L.O., Arutyunyan, T.V. (2013). Osoblyvosti tekhnolohiyi bezalkohol'nykh napoyiv z vykorystanniam dykorosloyi yahidnoyi syrovyny [Features of the technology of soft drinks using wild berry raw materials]. Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya [Integrated technologies and energy saving], 1, 1–11 [in Ukrainian].

8. Bondarchuk, Z.V., Kurylenko, Yu.M., Andronovych, H.M. (2022). Vykorystannya roslynnoyi syrovyny yak kompleks biolohichno aktyvnykh rehovyn dlya napoyiv funktsional'noho pryznachennya [The use of plant raw materials as a complex of biologically active substances for functional beverages]. Innovatsiyi ta tekhnolohiyi v sferi posluh i kharchuvannya [Innovations and technologies in the field of services and nutrition], 6, 38–43 [in Ukrainian].

9. Maleš, I., Pedisić, S., Zorić, Z., Elez-Garofulić, I., Repajić, M., You, L., Dragović-Uzelac, V. (2022). The medicinal and aromatic plants as ingredients in functional beverage production. *Journal of Functional Foods*, vol. 96, pp. 105210

10. Dovzhenko, I.S., Chepurna, O.L. (2020). Udoskonalennia tekhnolohii bezalkoholnykh napoyiv z vykorystanniam netradytsiynoyi syrovyny [Improving the technology of non-alcoholic beverages using non-traditional raw materials]. Proceeding in the Intehratiini ta innovatsiini napriamy rozvytku kharchovoi industrii (Ukraine, Cherkasy, 2020). Cherkasy: FOP Hordienko Ye.I., pp. 39–40 [in Ukrainian].

11. Molaveisi, M., Noghabi, M. S., Parastouei, K., Taheri, R.A. (2021). Fate of nano-phytosomes containing bioactive compounds of Echinacea extract in an acidic food beverage. *Food Structure*, vol. 27, pp. 100177.
12. Saleba, L.V., Yeshchenko, K.O. (2019). Identyfikatsiyna ekspertyza bezalkohol'nykh napoyiv [*Identification examination of soft drinks*]. *Visnyk Khersons'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu [Bulletin of the Kherson National Technical University]*, 2 (69), 126-133 [in Ukrainian].
13. Vorobyova, V.I., Chyhyrynets, O.E., Pylypenko, T.M., Khrokalo, L.A., Efimova, V.G. (2020). Tekhnichnyy analiz kharchovykh dobavok ta kosmetychnykh produktiv [Technical analysis of food additives and cosmetic products]. Kyiv: KPI im. Ihorya Sikors'koho [in Ukrainian].
14. Oliynichenko, Ya.O., Bilash, S. M., Pronina, O.M., Koptev M.M., Oliynichenko, M.O., Bezeha, O.V., Koval, Ya.V. Vplyv kompleksu kharchovykh dobavok na protsesy remodelyuvannya strukturnykh komponentiv tonkoho kyshechnyka, yak vazhlyva medyko-sotsial'na problema suchasnoho stanu zabezpechennya hromads'koho zdorov'ya naselennya Ukrainy [*The influence of a complex of food additives on the processes of remodeling of structural components of the small intestine, as an important medical and social problem of the current state of public health of the population of Ukraine*]. *Visnyk problem biolohiyi i medytsyny [Bulletin of Problems of Biology and Medicine]*, 3 (161), 65-70 [in Ukrainian].
15. DSTU 4069:2016 Napoyi bezalkohol'ni. Zahal'ni tekhnichni umovy [*Non-alcoholic drinks. General technical conditions*], Kyiv: DP «UkrNDNTS» [in Ukrainian].

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 18.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025

М. Є. РАЦУК

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри хімічних технологій, експертизи
та безпеки харчової продукції
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-1159-206X

Т. А. ЮРОВА

старший викладач кафедри хімічних технологій, експертизи
та безпеки харчової продукції
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-8147-7024

О. Б. КОНОФОЛЬСЬКА

здобувач освіти кафедри хімічних технологій, експертизи
та безпеки харчової продукції
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0007-2955-8330

К. С. РАЦУК

здобувач освіти кафедри хімічних технологій, експертизи
та безпеки харчової продукції
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0004-5458-7078

ЗАСТОСУВАННЯ ЕКСТРАКТІВ ЛІКАРСЬКИХ РОСЛИН ДЛЯ ОДЕРЖАННЯ ШАМПУНЮ ДЛЯ ВОЛОССЯ

Основною функцією шампуню для волосся є очищення. Від правильності догляду за волоссям залежить не лише зовнішній вигляд зачіски, але й стан здоров'я волосся. Процес вибору шампуню є важливим етапом у догляді, оскільки для оптимального підбору необхідно враховувати індивідуальні особливості волосся та шкіри голови. Очевидно, що для різних типів волосся (пошкодженого, схильного до жирності, із наявністю лупи тощо) доцільно застосовувати різні мийні засоби. Проте навіть правильно підібраний шампунь не завжди гарантує належний зовнішній вигляд волосся. Часто до складу піномийних засобів вводять агресивні хімічні компоненти, які покращують технологічні властивості продукту, однак є шкідливими для споживача.

На сучасному етапі розвитку косметичної галузі актуальним напрямом є розроблення екологічно безпечних косметичних засобів, до складу яких входять біологічно активні речовини природного, переважно рослинного походження. За твердженнями виробників, натуральні шампуні не лише ефективно очищують волосся, а й сприяють усуненню дерматологічних проблем, покращують стан сухого, жирного, тьмяного та ламкого волосся. Тому створення шампунів на основі природних компонентів без шкідливих домішок є актуальним науково-практичним завданням.

У ході дослідження було розглянуто можливість приготування шампуню з використанням екстрактів лікарських рослин. Введення рослинних екстрактів до складу шампуню сприяє покращенню стану волосся та шкіри голови. Зокрема, екстракт подорожника зміцнює волосся, стимулює його ріст, запобігає появі лупи, посіченню кінчиків, підвищує об'єм і блиск волосся; екстракт липи зменшує випадіння волосся, зволожує, надає сяйва, відновлює еластичність, забезпечує живлення волоссяних цибулин і стрижнів; екстракт ромашки надає заспокійливу дію на шкіру голови, має протизапальні та антисептичні властивості, зміцнює коріння волосся, покращує мікроциркуляцію та надає блиску.

Проведено дослідження органолептичних характеристик, показника рН, піноутворювальної здатності, кратності та стійкості піни шампуню з екстрактами лікарських рослин. Встановлено, що розроблений косметичний засіб відповідає вимогам чинної нормативно-технічної документації за основними показниками якості.

Ключові слова: шампунь, рослинні екстракти, волосся, косметика, піномиючі засоби.

M. YE. RATSUK

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Chemical Technology, Expertise
and Food Safety
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-1159-206X

T. A. YUROVA

Senior Lecturer at the Department of Chemical Technology, Expertise
and Food Safety
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-8147-7024

O. B. KONOFOLSKA

Student at the Department of Chemical Technology, Expertise
and Food Safety
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0007-2955-8330

K. S. RATSUK

Student at the Department of Chemical Technology, Expertise
and Food Safety
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0004-5458-7078

APPLICATION OF MEDICAL PLANT EXTRACTS FOR HAIR SHAMPOO PRODUCTION

The primary function of hair shampoo is cleansing. The overall appearance and health of the hair largely depend on proper care. The process of selecting an appropriate shampoo is an essential stage of hair care, as it requires consideration of the individual characteristics of both the hair and the scalp. It is evident that different types of hair (damaged, oily, or dandruff-prone) require the use of specific cleansing agents. However, even a correctly chosen shampoo does not always guarantee a healthy and aesthetically pleasing appearance. Frequently, commercial shampoos contain aggressive chemical components that improve the technological properties of the product but may be harmful to consumers.

At the current stage of cosmetic industry development, a relevant trend is the formulation of environmentally safe cosmetic products that include biologically active substances of natural, mainly plant-based, origin. According to manufacturers, natural shampoos not only effectively cleanse the hair but also help eliminate dermatological problems and improve the condition of dry, oily, dull, and brittle hair. Therefore, the development of shampoos based on natural ingredients, free from harmful additives, represents an important scientific and practical task.

The possibility of preparing shampoo containing medical plant extracts under home conditions was examined. The incorporation of plant extracts into the shampoo composition improves the condition of the hair and scalp. In particular, plantain extract strengthens the hair, stimulates growth, prevents dandruff and split ends, and enhances volume and shine; linden flower extract reduces hair loss, moisturizes, restores elasticity, nourishes hair roots and shafts, and adds natural glow; chamomile extract soothes the scalp, possesses anti-inflammatory and antiseptic properties, strengthens hair roots, improves microcirculation, and adds shine.

The organoleptic characteristics, pH value, foaming ability, foam multiplicity, and foam stability of the shampoo with herbal extracts were investigated. It was established that the developed cosmetic hair-washing product meets the requirements of current normative and technical documentation according to key quality indicators.

Key words: shampoo, plant extracts, hair, cosmetics, foaming agents.

Постановка проблеми

У наш час догляд за волоссям займає важливе місце. Одна з причин – це згубний вплив забрудненої атмосфери, незбалансоване харчування, використання «стайлінгових» засобів. Тому виробники шампунів розробляють нові технології та рецептури, щоб зменшити вплив негативних факторів на волосся. На сьогоднішній день існує великий асортимент шампунів імпортованих та вітчизняних виробників, а саме лікувальні, професійні, для різних типів волосся, з використанням натуральної сировини та іншими додатковими компонентами.

Індустрія догляду за волоссям переживає справжню революцію. Шампуні вже не просто засоби для миття – вони стають персоналізованими рішеннями для здоров'я шкіри голови, екологічними продуктами з біорозкладними компонентами та навіть лікувальними засобами з науково доведеною ефективністю.

Сучасні формули намагаються мінімізувати шкоду та дати максимум користі. Вони збалансовані так, щоб не руйнувати природний бар'єр шкіри голови та при цьому забезпечувати доглянутий вигляд волосся. Користувач отримує можливість вибрати засіб під індивідуальні особливості – від типу шкіри до структури волосся.

Сьогодні виробники роблять ставку на м'які компоненти рослинного походження, що очищають. Сучасний шампунь не обмежується функцією видалення забруднень. Він повинен очищати дбайливо, одночасно зволожувати та відновлювати волосся та захищати його від зовнішніх факторів [1,2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останнім часом вченими та виробниками шампуню зроблено чимало відкриттів у галузі косметології [1-4]. Головним чином досліджується склад шампуню, який постійно змінюється та покращується. Зокрема приділяється багато уваги вітамінізуванню товару та насиченню різними корисними речовинами рослинного походження: додаванню настоїв трав, екстрактів фруктів та рослин.

Індустрія краси активно впроваджує досягнення науки у шампуні нового покоління. З'являється новий клас продуктів – hairseuticals, які поєднують косметичну ефективність з лікувальними властивостями. Ці шампуні містять науково обґрунтовані інгредієнти для вирішення конкретних проблем: витончення волосся, лупи, сухості.

Загалом, головними трендами, що наразі домінують в догляді за волоссям, є:

- створення екологічної та безвідходної косметики, зокрема використання в складі шампуню натуральних компонентів, таких як алое вера, кокосова олія та ефірні олії;
- догляд не тільки за волоссям, але і за шкірою голови, наприклад, використання пілінгів, сироваток з пробіотиками, що допоможуть покращити ріст волосся та усунути проблеми, такі як сухість або надмірне виділення жиру;
- відмова від сульфатів, парабенів та силіконів у складі шампунів, створення натуральних засобів для миття волосся, що м'яко очищують, не порушуючи його природний баланс.

Таким чином, приготування шампуню, який містить натуральні інгредієнти, що не тільки очищують, а й сприяють покращенню стану волосся та шкіри голови, є актуальним завданням.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є виготовлення шампуню з комплексом корисних властивостей з використанням екстрактів рослинної сировини.

Викладення основного матеріалу дослідження

З давніх давен людина навчилася одержувати і застосовувати рослинні компоненти в косметичних цілях. Рослинні екстракти мають багато унікальних властивостей, корисні речовини в них працюють комплексно, доповнюючи і посилюючи одна одну. У складі косметичних засобів вони збагачують шкіру поживними компонентами, захищають від впливу зовнішніх факторів, мають омолоджувальний та оздоровлювальний ефект. Косметика з екстрактами рослин має властивість глибоко проникати в шкіру і доставляти активні інгредієнти безпосередньо в клітини.

Розширення асортименту косметичних шампунів, що виготовляються з використанням натуральної сировини є актуальним питанням сьогодення. Відповідна продукція користується попитом і буде задовольняти вимоги сучасних споживачів.

Незалежно від складу та призначення, шампуні мають відповідати наступним умовам:

1. Володіти великою знежирюючою і піноуючою здатністю (легко змивати жир з волосся, давати стійку дрібнодисперсну пінку).
2. Легко наноситися і змиватися з волосся (крім відтінкових шампунів), вільно виливатися або видавлюватися із туб.
3. Мати м'якість. Зв'язування іонів кальцію із твердої води із жирами волосся та шкіри голови може нашкодити як шкірі, так і волосся.
4. Мати показник рН у межах фізіологічної норми від 3,5 до 8,5.
5. Надавати волосю шовковистість, пухнастість, природний блиск.
6. Забезпечувати легке розчісування волосся, освіжати та підтримувати еластичність волосся без надмірного знежирення.
7. Відповідати призначенню в залежності від структури і стану волосся.
8. Мати захисні, живильні, антистатичні властивості.
9. Не мати подразнюючі, токсичні і алергічні властивості.
10. Тривалий час забезпечувати косметичний ефект [5].

В роботі з метою надання корисних властивостей шампуню пропонується застосування екстрактів лікарських рослин, таких як подорожник, липа та ромашка, які здатні позитивно впливати на стан шкіри голови та волосся.

Подорожник завдяки своєму унікальному складу застосовується в косметології з давніх часів. Він багатий на вітаміни С і В, містить лимонну кислоту, фітонциди у високій концентрації. Листя подорожника містять речовини, що сприяють регенерації всіх видів тканин організму людини, а насіння – олеїнову кислоту, сапоніни, складні вуглеводи. Таким багатим складом пояснюються унікальні лікувальні властивості подорожника для волосся. Подорожник запобігає появі лупи, збільшує об'єм волосся і надає йому блиск. Екстракт подорожника використовують для:

- відновлення структури волоссяного стрижня;
- відновлення посічених кінчиків;
- нормалізації вироблення шкірного сала (подорожник робить сухе волосся живим і еластичним, сприяє зменшенню сальності жирного волосся);

- нормалізації мікрофлори шкіри голови;
- посилення росту волосся;
- харчування волоссяних цибулин;
- поліпшення кровообігу [6].

Екстракт квітів липи – це натуральний засіб, який допомагає заспокоїти та пом'якшити волосся, зупиняє його випадіння, зволожує і надає сяйво, підтримує живлення коренів і стрижнів волосся та ефективно відновлює його еластичність. Квіти липи містять безліч корисних речовин, до них відносяться вітаміни С і А, дубильні речовини, сапоніни, залізо, кальцій, калій, магній, флавоноїди, гесперидин (глікозид), а також ефірна олія.

Позитивний вплив квітів липи для волосся і шкіри голови полягає в наступному:

- зміцнює волоссяні цибулини;
- надає волоссям натурального блиску;
- запобігає появі посічених кінчиків;
- усуває свербіж, лупу, лущення, почервоніння та інші висипи різної етіології;
- наповнює шкіру і волосся вітамінами і мінеральними речовинами;
- спрощує процес розчісування, роблячи волосся більш слухняним;
- стимулює ріст волосся [7].

Завдяки своїм корисним властивостям, ромашка – популярний засіб для волосся. Вона допомагає оздоровити шкіру голови і дарує волоссям легкість, блиск, еластичність. Лікувальні властивості рослини проявляються внаслідок наявності багатьох активних речовин. Квітки ромашки містять вітаміни, ефірні олії, барвники, кислоти – нікотинову, валеріанову, саліцилову, мінеральні речовини – селен, цинк, мідь.

Корисні компоненти, які містяться в квітах ромашки, оздоровлюють та захищають волоссяну частину голови від шкідливої дії екологічних факторів. Сприятлива дія цілющої рослини підтверджена роками успішного використання. Відомо, що ромашка діє на волосся наступним чином:

- нормалізує діяльність сальних залоз, злегка знижує їх активність, і тому відмінно підходить для догляду за жирним волоссям;
- зміцнює волоссяні фолікули і справляється з проблемою посиленого випадіння волосся;
- надає антисептичну дію на шкіру голови, усуває лупу;
- допомагає відновити волосся після фарбування стійкими фарбами або хімічної завивки;
- зміцнює волосся по всій довжині, запобігає утворенню посічених кінчиків;
- прискорює ріст волосся.

Також ромашка освітлює волосся і надає їм красивий відтінок, але добре помітний цей ефект тільки у блондинок [8].

Першим етапом роботи було одержання рослинних екстрактів. Як відомо, якість екстракту залежить від наступних основних факторів: використані частини рослин як сировини, їх вологість і ступінь подрібнення; розчинник, що використовується для екстракції, метод його застосування; співвідношення між рослинною сировиною та розчинником. В якості розчинника можна використовувати етиловий спирт або водно-спиртові суміші, масла, ефіри та інші речовини. Одним з найбільш поширених способів отримання екстрактів з лікарських рослин є використання води як екстрагента. Серед переваг водних екстрактів можна відзначити їхню простоту і доступність у приготуванні, комплексну дію та високу біодоступність біологічно активних речовин [9].

Для приготування екстрактів подорожника, липи та ромашки наважки лікарських рослин поміщали в посудину, заливали кожен кип'яченою водою, закривали кришками та настоювали 15 хвилин, після чого охолоджували та профільтровували. Одержані екстракти лікарських рослин додавали до рецептури шампуню в якості водної фази у рівних співвідношеннях (1:1:1).

Органолептичні та фізико-хімічні показники якості одержаного шампуню для волосся в порівнянні з вимогами нормативних документів наведено в табл. 1.

Одержані дані свідчать, що приготований шампунь є рідким, однорідним засобом світло-коричневого кольору, прозорим, має приємний аромат лікарських рослин. Високі показники піноутворюючої здатності, стійкості та кратності піни, а також значення водневого показника, що знаходиться в допустимих межах, доводять можливість використання екстрактів лікарських рослин при виготовленні миючого засобу.

Надалі рекомендується проведення хімічних, мікробіологічних та гігієнічних досліджень з метою впровадження шампуню для волосся з екстрактом лікарських рослин у промислове виробництво.

Висновки

1. Розроблено рецептуру шампуню з додаванням водних екстрактів квітів липи, квітів ромашки та листя подорожника. Введення до складу шампуню екстрактів лікарських рослин сприяє покращенню стану волосся та шкіри голови за рахунок активних компонентів рослинної сировини.

2. Доведено, що одержаний шампунь має однорідну консистенцію, приємний аромат, а також достатньо високі показники піноутворюючої здатності, стійкості та кратності піни, значення водневого показника знаходиться в допустимих межах.

Таблиця 1

Органолептичні та фізико-хімічні показники шампуню для волосся

Назва показника	Характеристика та значення	
	згідно вимог	дослідний зразок
Зовнішній вигляд	Однорідна однофазна або багатофазна рідина без сторонніх домішок. Допускається наявність перламутру.	Однорідна однофазна рідина без сторонніх домішок.
Колір	Повинен відповідати кольору виробу певної назви.	Однорідний, світло-коричневий.
Запах	Повинен відповідати запаху виробу певної назви.	Приємний, трав'яний.
Водневий показник (pH), од. pH	3,5 – 8,5	5
Піноутворювальна здатність: пінне число, не менше ніж	145,0	175
Кратність піни	–	2,9
Коефіцієнт стійкості піни	0,8 – 1,0	1,7

Список використаної літератури

1. Шампуні майбутнього: що змінюється в догляді за волоссям у 2025 році. URL: <https://gloss.ua/ua/society/142275-shampuni-majbutnoho-shcho-zminjujetsja-v-dohljadi-za-volossjam-u-2025-rotsi>.
2. Трендова косметологія: чим нові лінійки шампунів відрізняються від звичайної продукції. URL: <https://interfax.com.ua/news/promo/1107518.html>.
3. Доманова О. В., Шматченко А. С. Розроблення нового упакування для шампуню на основі аналізу технологій косметичної промисловості. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2011. Вип. 1(13). С. 424-427.
4. Тренди по догляду за волоссям в 2025 році. URL: <https://gobeautystudios.com/trendy-po-dohljadi-za-volossjam-u-2025-rotsi/>
5. Пешук Л. В., Бавіка Л. І., Демідов І. М. Технологія парфумерно-косметичних продуктів. К. : Центр учбової літератури, 2007. 376 с.
6. Чим корисний подорожник для волосся. URL: <https://blossom.com.ua/?p=81212>.
7. Липа: корисні властивості та протипоказання. URL: <https://zapitay.com.ua/?p=38732>.
8. Чим корисна ромашка для волосся. URL: <https://we.kyiv.ua/чим-корисна-ромашка-для-волосся/>
9. Рубан О. А. Практикум з промислової технології лікарських засобів. Х. : НФаУ, 2017. 374 с.

References

1. Shampuni maibutnoho: shcho zminiuietsia v dohljadi za volossiam u 2025 rotsi. URL: <https://gloss.ua/ua/society/142275-shampuni-majbutnoho-shcho-zminjujetsja-v-dohljadi-za-volossjam-u-2025-rotsi>.
2. Trendova kosmetolohiia: chym novi liniiky shampuniv vidrizniaiutsia vid zvychai noi produktsii. URL: <https://interfax.com.ua/news/promo/1107518.html>.
3. Domanova O. V., Shmatchenko A. S. (2011) Rozroblennia novoho upakuvannia dlia shampuniu na osnovi analizu tekhnolohii kosmetychnoi promyslovosti [Development of new packaging for shampoo based on analysis of cosmetic industry technology]. *Prohresyvni tekhnika ta tekhnolohii kharchovykh vyrobnytstv restorannoho hospodarstva i torhivli*. no. 1(13). pp. 424-427. (in Ukrainian)
4. Trendy po dohljadi za volossiam v 2025 rotsi. URL: <https://gobeautystudios.com/trendy-po-dohljadi-za-volossiam-u-2025-rotsi/>
5. Peshuk L. V., Bavika L. I., Demidov I. M. (2007). Tekhnolohiia parfumerno-kosmetychnykh produktiv [Technology of perfume and cosmetic products]. K. : Tsentri uchbovoi literatury. (in Ukrainian)
6. Chym korysnyi podorozhnyk dlia volossia. URL: <https://blossom.com.ua/?p=81212>.
7. Lypa: korysni vlastyvoli ta protypokazannia. URL: <https://zapitay.com.ua/?p=38732>
8. Chym korysna romashka dlia volossia. URL: <https://we.kyiv.ua/chym-korysna-romashka-dlia-volossia/>
9. Ruban O. A. Praktykum z promyslovoi tekhnolohii likarskykh zasobiv [Workshop on industrial technology of medicinal products]. (2017). Kh. : NFaU. (in Ukrainian)

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.11.2025
 Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025
 Дата публікації: 31.12.2025

НОТАТКИ

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 31.12.2025.

Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman. Папір офсет. Цифровий друк.
Ум. друк. арк. 44,87. Замов. № 0126/037. 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.