

ISSN 2078-4481

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

# ВІСНИК

ХЕРСОНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО  
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

## 3(90)

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Херсонського національного технічного університету  
(протокол № 3 від 29.10.2024 року)

---

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України  
категорії «Б» за економічними науками, спец. – 051, 071, 072, 073, 075, 076, 242  
(Наказ МОН України від 17.03.2020 № 409),  
281 (Наказ МОН України від 29.06.2021 № 735);  
та за технічними науками, спец. – 121, 122, 123, 125, 126, 131, 132, 133, 151, 274, 275  
(Наказ МОН України від 02.07.2020 № 886)  
та спец. 141, 161, 182 (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»  
2024

## Редакційна колегія

### Головний редактор

Литвиненко В.І.

д.т.н., професор, завідувач кафедри інформатики і комп'ютерних наук,  
заслужений діяч науки і техніки України

### Заступник головного редактора

Сарібєкова Ю.Г.

д.т.н., професор, проректор з наукової роботи та міжнародних зв'язків

Шерстюк В.Г.

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

### Відповідальний секретар

Лур'є І.А.

к.т.н., доцент, начальник навчально-методичного відділу, доцент кафедри інформатики і комп'ютерних наук

## Члени редакційної колегії

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

**ISSN 2078-4481**

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE  
KHERSON NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY**

**VISNYK**

**OF KHERSON NATIONAL  
TECHNICAL UNIVERSITY**

**3(90)**

Recommended for publication by the Academic Council  
of Kherson National Technical University  
(Minutes № 3 on 29th October 2024)

---

The journal is included in the List of Scientific Professional Editions of Ukraine Category “B”  
in economics, special. – 051, 071, 072, 073, 075, 076, 242  
(Ukraine Education and Science Ministry Order dated 17.03.2020, № 409),  
281 (Ukraine Education and Science Ministry Order dated 29.06.2021, № 735);  
and technical sciences, special. – 121, 122, 123, 125, 126, 131, 132, 133, 151, 274, 275  
(Ukraine Education and Science Ministry Order dated 02.07.2020, № 886)  
and special. 141, 161, 182  
(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”  
2024

## Editorial Board

### Editor-in-Chief

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

### Deputy Editor-in-Chief

Saribekova Yu.G.  
Doctor of Engineering Science, Professor, Vice-Rector for Scientific Work and International Relations

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

### Executive Secretary

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

### Members of Editorial Board

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

## ЗМІСТ

## ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

<b>А. В. Бернацький, Ю. В. Юрченко, О. В. Сіора, М. В. Соколовський, І. В. Сіора.</b> Дослідження впливу лазерного випромінювання на полімерні матеріали.....	11
<b>Р. О. Бондар, І. А. Гришко.</b> Доцільність використання технології ультразвукової кавітації для переробки важких нафтопродуктів.....	18
<b>Ю. О. Вовк, Д. А. Петрук.</b> Стійкість біодизельного палива до мікробіологічного ураження.....	24
<b>В. І. Воробійова, М. І. Скиба, А. С. Мощенко.</b> Добір компонентів для синтезу нових низькотемпературних евтектичних розчинників на основі квантово-хімічного моделювання.....	31
<b>С. П. Денисюк, Г. С. Белоха, І. С. Чернечук.</b> Оптимізація енергопроцесів в системах енергозабезпечення з неінтрузивним моніторингом.....	38
<b>В. А. Зозуля, С. І. Осадчий.</b> Технологія структурного перетворення двоконтурної багатовимірної слідкувальної системи керування до систем стабілізації.....	45
<b>О. В. Золотарьова.</b> Визначення кінетичних характеристик процесу кристалізації карбонату кальцію з рідких відходів содового виробництва.....	52
<b>О. В. Кириллова, Р. І. Гнідой.</b> Внутрішній водний транспорт України: перспективи розвитку в контексті європейської інтеграції та правових реформ.....	59
<b>П. В. Луб'яний, О. А. Войтович, В. М. Мосьпан, Н. В. Мосьпан.</b> Управління якістю транспортного обслуговування.....	68
<b>Ю. Р. Луста, О. С. Мачуга.</b> Визначення меж безпечної експлуатації лісової машини з асиметрично розміщеним робочим органом на території з ухилом.....	75
<b>В. А. Мардзявко, А. Ю. Руденко.</b> Теоретичні та практичні аспекти застосування генераторів НВЧ для знезараження зернових культур.....	85
<b>Л. І. Мельник, О. М. Шнирук, Є. А. Колобовнікова.</b> Полімерні композити з використанням відсівів андезиту: структурні та механічні аспекти.....	95
<b>В. В. Михайлюк.</b> Сепаратор для відокремлення конденсату водяної пари з димових газів цементного виробництва.....	103
<b>A. V. Pliasovska, D. Yu. Ushcharovskiy, V. I. Vorobyova, G. S. Vasyliiev, O. V. Linyucheva.</b> Physico-mechanical properties of metallic parts electrochemically printed using copper nitrate electrolyte.....	111
<b>В. П. Славич, М. О. Савченко.</b> Модель управління параметрами світлофорної сигналізації в залежності від встановленої пропускну здатності.....	118
<b>М. В. Соколовський, О. В. Сіора, Ю. В. Юрченко, В. А. Лукашенко, А. В. Бернацький.</b> Встановлення впливу складових технологічних режимів на формоутворення наплавленого шару при лазерному наплавленні на тонкостінну основу.....	123
<b>О. О. Stozhok.</b> Exploring electromechanical systems in the development of next-generation electric powertrains.....	132
<b>Н. В. Тарельник.</b> Удосконалення технології електроіскрового легування деталей насосів атомних електростанцій.....	141
<b>М. Д. Швець.</b> Моделювання процесів взаємодії видів транспорту для оптимізації логістичних ланцюгів.....	147
<b>О. Ю. Юрченко, Т. П. Волошко.</b> Методи контролю та врегулювання складних ситуацій на транспорті за порушень допустимої вантажопідйомності транспортного засобу при перевезенні зерна.....	154

## ТЕХНОЛОГІЯ ЛЕГКОЇ ТА ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

<b>Л. Є. Галавська, І. О. Дудник, А. Т. Арабулі, Д. І. Кольчик.</b> Дослідження впливу технологічних факторів на релаксаційні характеристики трикотажного матеріалу чохла для культі.....	163
<b>О. М. Камінський, Р. О. Денисюк, М. В. Чайка, С. В. Писаренко, О. С. Євдоченко, О. В. Анічкіна, О. Ю. Авдєєва, Ю. В. Лисецька.</b> Адсорбція конго червоного з розчину поверхнею нікель-ітрієвого гранату.....	173

<b>О. М. Камінський, Р. О. Денисюк, М. В. Чайка, С. В. Писаренко, О. С. Євдоченко, Д. Ю. Панасюк.</b> Адсорбційна очистка води від іонів Cd(II) магніточутливим нанoadсорбентом Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /гідроксиапатит.....	180
<b>І. В. Кравчук, Л. В. Салєба, О. Я. Семешко.</b> Розробка складу та дослідження властивостей емульсії косметичного призначення із застосуванням композицій силікону та силіконового екстракту календули лікарської.....	187
<b>Л. В. Салєба, Р. В. Гаргаун.</b> Перспективи використання ефірної олії м'яти перцевої для косметичної продукції на емульсійній основі.....	201

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<b>V. G. Vasenko, N. V. Kornilovska, S. V. Vyshemyrska, M. V. Karamushka.</b> Accelerating image processing using parallel computations in OpenMP: development and performance analysis of a graphics editor.....	206
<b>М. О. Волк, А. М. Бугрій, І. А. Самойлов, А. А. Фурманов, О. Ю. Журавльов, Д. М. Волк.</b> Симуляція та управління туманними та обlačними обчисленнями для інтернету речей .....	215
<b>V. M. Kozel, Ie. A. Drozdova, O. I. Ivanchuk, O. O. Prykhodko.</b> Research of penetration testing methods.....	221
<b>Г. В. Марчук, М. С. Граф, В. Л. Левківський, Ю. В. Венгловська.</b> Аналіз та порівняння існуючих методів генерації лабіринтів в комп'ютерних іграх.....	228
<b>Д. В. Мельниченко, Т. А. Вакалюк, О. В. Фаррахов, І. В. Гордієнко.</b> Проектування вебзастосунку для керування робочим часом.....	238
<b>Ю. Л. Новіков, І. М. Гамор, С. В. Поперешняк.</b> Огляд моделей та алгоритмів оптимізації інтерфейсів додатків на основі поведінкових даних користувачів.....	251
<b>М. Ю. Овчинников, В. М. Слатвінська.</b> Технічний та нормативно-правовий аспекти захисту об'єктів інтелектуальної власності на ринку аудіо-візуальної продукції.....	259
<b>В. М. Пахомова, О. В. Галушка.</b> Дослідження дворівневого виявлення Probe атак засобами нейронних мереж.....	271
<b>І. Ф. Повхан, А. В. Легеза, В. Я. Сароз, В. О. Яковлев.</b> Задача оцінки якості навчального контенту.....	278
<b>Н. А. Потапова, Л. О. Волонтир, О. В. Зелінська.</b> Апроксимація функцій причинно-наслідкових зв'язків метрик виробництва в аналізі даних галузі тваринництва .....	285
<b>М. О. Слабінога, Т. В. Бойчук, Д. О. Фещак.</b> Автоматизація процесу прийому та опрацювання заявок засобами Telegram-бота та програмного інтерфейсу системи OpenProject .....	293
<b>В. М. Ткачов, І. С. Чепурна, Т. Г. Фесенко.</b> Метод мультирівневого VPN-тунелювання для забезпечення віддаленого доступу до вузлів екстранет-мережі.....	299
<b>Л. С. Фонар, О. С. Логіс.</b> Аналіз особливостей управління ризиками ІТ проєктів в умовах вигорання.....	309
<b>Д. Р. Чанкветадзе, Л. І. Фешанич.</b> Інтеграція штучного інтелекту та цифрових технологій у виробництво дронів: інноваційні підходи до підвищення ефективності.....	315

## УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ

<b>R. Grascht, P. V. Mateichyk.</b> Complex methodology of managing the development of the charging station network.....	324
<b>О. В. Кокорєва, А. І. Міронов.</b> Розробка пропозицій щодо корпоратизації оборонних підприємств .....	331
<b>Л. Р. Струтинська, С. Є. Бойківська.</b> Оптимізація вартості навчання студентів, що навчаються за кошти фізичних чи юридичних осіб.....	337

## ПУБЛІЧНЕ УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ

<b>С. А. Дяченко, І. В. Назаренко.</b> Застосування моделі Triple Helix як чинника стимулювання розвитку інноваційного підприємництва на регіональному рівні.....	344
<b>Н. М. Ковальська, В. М. Демченко.</b> Управлінський конфлікт і медіація як засіб його вирішення.....	352
<b>В. В. Крейденко.</b> Парламент і парламентаризм в Україні: державно-управлінські та політико-правові аспекти .....	359
<b>О. V. Polovtsev, D. S. Naumov, O. Ya. Romanuyk.</b> Methodology's of the systemic approach application to solving typical tasks of public administration.....	365

---

<b>І. М. Шупта.</b> Етичні дилеми в професійній діяльності та самоменеджменті публічних службовців в умовах війни.....	371
--	-----

## СОЦІАЛЬНІ ТА ПОВЕДІНКОВІ НАУКИ

<b>І. В. Вигоднер.</b> Компетентнісний підхід при викладанні дисципліни «Економіко-математичні методи і моделі: оптимізаційні методи і моделі» .....	378
<b>Т. В. Чижова, О. С. Новосьолова.</b> Сучасна практика оподаткування операцій із криптовалютами.....	384

**CONTENTS**

**ENGINEERING SCIENCES**

**A. V. Bernatskyi, Yu. V. Yurchenko, O. V. Siora, M. V. Sokolovskiy, I. V. Siora.** Study of the effect of laser radiation on polymeric materials..... 11

**R. O. Bondar, I. A. Hryshko.** Analysis of the state of innovative solutions in the field of ultrasonic cavitation’s impact on heavy oil products..... 18

**Yu. O. Vovk, D. A. Petruk.** Resistance of biodiesel fuel to microbiological contamination..... 24

**V. I. Vorobyova, M. I. Skiba, A. S. Moshenko.** Selection of components for the synthesis of new low-temperature eutectic solvents based on quantum-chemical simulation..... 31

**S. P. Denysiuk, H. S. Bielokha, I. S. Cherneshchuk.** Optimization of energy processes in energy supply systems with non-instrutive monitoring..... 38

**V. A. Zozulia, S. I. Osadchiy.** The structural transformation technology of a two-loop multidimensional tracking control system into stabilization systems..... 45

**O. V. Zolotarova.** Determination of kinetic characteristics of calcium carbonate crystallization process from liquid waste of soda production..... 52

**O. V. Kirillova, R. I. Hnidoi.** Inland waterway transport of Ukraine: development prospects in the context of of european integration and legal reforms..... 59

**P. V. Lubyanyi, O. A. Voytovich, V. M. Mospan, N. V. Mospan.** Quality management of transport services..... 68

**Yu. R. Lusta, O. S. Machuha.** Determination of safe operation limits for a forest machine with asymmetric positioning of the working tool on sloped terrain..... 75

**V. A. Mardziavko, A. Yu. Rudenko.** Theoretical and practical aspects of using microwave generators for grain crops disinfection..... 85

**L. I. Melnyk, O. M. Shnyruk, Y. A. Kolobovnikova.** Polymer composites using andesite fives: structural and mechanical aspects..... 95

**V. V. Mykhailiuk.** Separator for separation of water vapor condensate from flue gases of cement production..... 103

**A. V. Pliasovska, D. Yu. Ushchapovskiy, V. I. Vorobyova, G. S. Vasyliiev, O. V. Linyucheva.** Physico-mechanical properties of metallic parts electrochemically printed using copper nitrate electrolyte..... 111

**V. P. Slavych, M. O. Savchenko.** Model of control of the parameters of the light force signaling depending on the set performance capacity..... 118

**M. V. Sokolovskiy, O. V. Siora, Yu. V. Yurchenko, V. A. Lukashenko, A. V. Bernatskyi.** Determining the influence of the technological mode variables on the formation of the deposited layer during laser cladding on a thin-walled base..... 123

**O. O. Stozhok.** Exploring electromechanical systems in the development of next-generation electric powertrains..... 132

**N. V. Tarelnyk.** Improving the technology of electro-spark alloying the component parts for the pumps of nuclear power plants..... 141

**M. D. Shvets.** Modeling of processes of interaction of transport modes for optimization of logistics chains..... 147

**O. Yu. Yurchenko, T. P. Voloshko.** Methods of control and adjustment of complex transport situations due to violation of the allowable load capacity of the vehicle when transporting grain..... 154

**THE TECHNOLOGY OF LIGHT AND FOOD INDUSTRY**

**L. Ye. Halavska, I. O. Dudnyk, A. T. Arabuli, D. I. Kolchyk.** Study of the influence of technological factors on the relaxation characteristics of a knitted material cover for stumps..... 163

**O. M. Kaminskiy, R. O. Denysiuk, M. V. Chayka, S. V. Pysarenko, O. S. Yevdochenko, O. V. Anichkina, O. Yu. Avdieieva, Yu. V. Lysetska.** Adsorption of congo red from a nickel-yttrium garnet surface solution..... 173

**O. M. Kaminskiy, R. O. Denysiuk, M. V. Chayka, S. V. Pysarenko, O. S. Yevdochenko, D. Yu. Panasiuk.** Adsorption of water from Cd(II) ions with magneto-sensitive nanoadsorbent Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/hydroxyapatite..... 180

**I. V. Kravchuk, L. V. Saleba, O. Ya. Semeshko.** Development of the composition and study of the properties of a cosmetic emulsion using compositions of silicone and silicone extract of calendula officinalis..... 187



**L. V. Saleba, R. V. Harhaun.** Perspectives of using peppermint essential oil for emulsion-based cosmetic products.....201

## INFORMATION TECHNOLOGIES

**V. G. Vasenko, N. V. Kornilovska, S. V. Vyshemyrska, M. V. Karamushka.** Accelerating image processing using parallel computations in OpenMP: development and performance analysis of a graphics editor..... 206

**M. O. Volk, A. M. Buhrii, I. A. Samoilo, I. A. Furmanov, I. A. Zhuravlyov, D. M. Volk.** Simulation and management of fog and cloud computing for the internet of things..... 215

**V. M. Kozel, Ie. A. Drozdova, O. I. Ivanchuk, O. O. Prykhodko.** Research of penetration testing methods.....221

**G. V. Marchuk, M. S. Graf, V. L. Levkivskyi, Yu. V. Venhlovska.** Analysis and comparison of existing maze generation methods in computer games.....228

**D. V. Melnychenko, T. A. Vakaliuk, O. V. Farrakhov, I. V. Hordienko.** Web application design for working time management..... 238

**Yu. L. Novikov, I. M. Hamor, S. V. Popereshnyak.** Overview of models and algorithms for optimizing application interfaces based on user behavioral data..... 251

**M. Yu. Ovchinnikov, V. M. Slatvinska.** Technical and regulatory aspects protection of intellectual property in the audio-visual market..... 259

**V. M. Pakhomova, O. V. Halushka.** Two-level detection of Probe attacks by means of neural networks.....271

**I. F. Povkhan, A. V. Legeza, V. Ya. Saroz, V. O. Yakovlev.** The task of evaluating the quality of educational content..... 278

**N. A. Potapova, L. O. Volontyr, O. V. Zelinska.** Approximation of functions of cause-effect relationships of production metrics in the analysis of data in the livestock industry..... 285

**M. O. Slabinoha, T. V. Boichuk, D. O. Feshchak.** Automation of technical support receiving and processing application process using Telegram bot and OpenProject API.....293

**V. M. Tkachov, I. S. Chepurna, T. G. Fesenko.** Multi-level VPN-tunneling method for ensuring remote access to extranet network nodes..... 299

**L. S. Fonar, O. S. Lotis.** Analysis of risk management in IT projects under burnout conditions..... 309

**D. R. Chankvetadze, L. I. Feshanich.** Integration of artificial intelligence and digital technologies in drone manufacturing: innovative approaches to enhancing efficiency ..... 315

## MANAGEMENT AND ADMINISTRATION

**R. Grascht, P. V. Mateichyk.** Complex methodology of managing the development of the charging station network.....324

**O. V. Kokorieva, A. I. Myronov.** Development of proposals regarding the corporation of defense enterprises.....331

**L. R. Strutynska, S. Ye. Boikivska.** Optimization of the cost of education of students educated at the expense of individuals or legal entities.....337

## PUBLIC MANAGEMENT AND ADMINISTRATION

**S. A. Diachenko, I. V. Nazarenko.** Application of the Triple Helix model as a factor for stimulate the development of innovative entrepreneurship at the regional level..... 344

**N. M. Koval's'ka, V. M. Demchenko.** Management conflict and mediation as a means of its resolution.....352

**V. V. Kreidenko.** Parliament and parliamentarism in Ukraine: public administrative and political and legal aspects...359

**O. V. Polovtsev, D. S. Naumov, O. Ya. Romanuyk.** Methodology's of the systemic approach application to solving typical tasks of public administration..... 365

**I. M. Shupta.** Ethical dilemmas in the professional activities and self-management of public servants in the conditions of war..... 371

---

## **SOCIAL AND BEHAVIORAL SCIENCES**

<b>I. V. Vygodner.</b> Competent approach to teaching the discipline “Economics-mathematical methods and models: optimization methods and models”.....	378
<b>T. V. Chyzhova, O. S. Novosolova.</b> Modern taxation practice of transactions with cryptocurrencies.....	384

## ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 621.373.826:691.175

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.1>**А. В. БЕРНАЦЬКИЙ**

кандидат технічних наук, старший дослідник,  
завідувач відділу спеціалізованої високовольтної техніки  
та лазерного зварювання  
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона  
Національної академії наук України  
ORCID: 0000-0002-8050-5580

**Ю. В. ЮРЧЕНКО**

провідний інженер відділу спеціалізованої високовольтної техніки  
та лазерного зварювання  
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона  
Національної академії наук України  
ORCID: 0000-0001-9253-009X

**О. В. СІОРА**

науковий співробітник відділу спеціалізованої високовольтної техніки  
та лазерного зварювання  
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона  
Національної академії наук України  
ORCID: 0000-0003-1927-790X

**М. В. СОКОЛОВСЬКИЙ**

провідний інженер відділу спеціалізованої високовольтної техніки  
та лазерного зварювання  
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона  
Національної академії наук України  
ORCID: 0000-0003-3243-5060

**І. В. СІОРА**

кандидат хімічних наук,  
науковий співробітник відділу біомедичних проблем поверхні  
Інститут хімії поверхні імені О. О. Чуйка  
Національної академії наук України  
ORCID: 0000-0002-4436-8945

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ  
НА ПОЛІМЕРНІ МАТЕРІАЛИ**

*FPV (First Person View) дрони отримали значний розвиток завдяки швидкому прогресу в електроніці та технологіях. Вони активно використовуються у спортивних перегонках, відеозйомці, доставці вантажів, моніторингу, а також у військових цілях, особливо для розвідки й доставки вибухових пристроїв. Сучасні FPV дрони мають розміри від 50 мм до понад 300 мм, з гвинтами, виготовленими з матеріалів на основі полікарбонату або карбону. Ці матеріали забезпечують легкість конструкції та високу ударостійкість, що робить їх складними для традиційних методів знешкодження. Враховуючи зростаючу загрозу їхнього використання у військових та терористичних операціях, розробляються нові системи протидії FPV дронам. Зокрема, лазерні системи стають одним з перспективних засобів боротьби, оскільки дозволяють точково впливати на дрони на відстані без витрат на боєприпаси. У таких системах головною метою є руйнування ключових компонентів дрона, зокрема гвинтів, які через високу термочутливість стають вразливими до лазерного випромінювання. Для дослідження впливу лазерного випромінювання на пропелери FPV дронів проводились випробування із застосуванням Nd:YAG-лазера «DY044» з потужністю до 4,4 кВт і довжиною хвилі  $\lambda=1,06$  мкм. Пропелери для тестів були виготовлені з полікарбонату, діаметром 7,5 дюймів. Випробування проводились при різних потужностях лазерного випромінювання та діаметрах пучка. Пропелер закріплювався на дралі та обертався зі швидкістю 2000 обертів за хвилину під кутом  $90^\circ$  відносно лазерного променя, діаметр якого варіювався від 4 до 10 мм. Згідно з результатами досліджень,*

час опромінення менш ніж 2 секунди та потужність 2 кВт виявилися недостатніми для гарантованого руйнування пропелера. Однак при потужності 4 кВт та часу опромінення 1–2 секунди спостерігалося гарантоване руйнування полікарбонату. При збільшенні діаметра лазерного променя до 10 мм і потужності 4 кВт руйнування відбувалося лише при збільшенні часу опромінення до 2 секунд. Аналіз поглинання енергії пропелером показав, що при потужності випромінювання 500 Вт після проходження через пропелер із полікарбонату 290 Вт поглиналося матеріалом, що становить 58%. Отримані результати підтверджують перспективність використання лазерних систем для ефективного знешкодження FPV дронів, особливо завдяки можливості налаштування параметрів випромінювання для досягнення гарантованого руйнування критичних компонентів, таких як пропелери.

**Ключові слова:** FPV дрони, гвинти дронів, полімерні матеріали, лазерне випромінювання, термічний вплив, руйнування, плавлення.

A. V. BERNATSKYI

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,  
Head of the Department of Specialised High-Voltage Equipment  
and Laser Welding  
E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0000-0002-8050-5580

YU. V. YURCHENKO

Lead Engineer at the Department of Specialised High-Voltage Equipment  
and Laser Welding  
E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0000-0001-9253-009X

O. V. SIORA

Researcher at the Department of Specialised High-Voltage Equipment  
and Laser Welding  
E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0000-0003-1927-790X

M. V. SOKOLOVSKYI

Lead Engineer at the Department of Specialised High-Voltage Equipment  
and Laser Welding  
E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0000-0003-3243-5060

I. V. SIORA

Candidate of Chemical Sciences,  
Researcher at the Department of Biomedical Surface Problems  
Chuiko Institute of Surface Chemistry  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0000-0002-4436-8945

## STUDY OF THE EFFECT OF LASER RADIATION ON POLYMERIC MATERIALS

FPV (First Person View) drones have developed significantly due to rapid advances in electronics and technology. They are widely used in sports racing, videography, cargo delivery, monitoring, and military applications, especially for reconnaissance and delivery of explosive devices. Modern FPV drones range in size from 50 mm to over 300 mm, with propellers made of polycarbonate or carbon fibre materials. These materials provide lightweight construction and high impact resistance, making them challenging for traditional methods of neutralisation. Given the growing threat of their use in military and terrorist operations, new systems are being developed to counter FPV drones. In particular, laser systems are becoming one of the most promising means of countering drones, as they allow for targeted effects on drones from a distance without the need for ammunition. In such systems, the main goal is to destroy key components of the drone, in particular the propellers, which are vulnerable to laser radiation due to their high thermal sensitivity. To investigate the effect of laser radiation on FPV drone propellers, tests were conducted using a DY044 Nd:YAG laser with a power of up to 4.4 kW and a wavelength of  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ . The test propellers were made of polycarbonate with a diameter of 7.5 inches. The tests were carried out at different laser powers and beam diameters. The propeller was mounted on the drill and

rotated at a speed of 2000 revolutions per minute at a 90° angle to the laser beam, whose diameter varied from 4 to 10 mm. According to the results of the study, an exposure time of less than 2 seconds and a power of 2 kW were insufficient to guarantee the destruction of the propeller. However, with a power of 4 kW and an irradiation time of 1–2 seconds, guaranteed destruction of polycarbonate was observed. When the laser beam diameter was increased to 10 mm and the power was 4 kW, destruction occurred only when the irradiation time was increased to 2 seconds. The analysis of energy absorption by the propeller showed that at a radiation power of 500 W, 290 W was absorbed by the material after passing through the polycarbonate propeller, which is 58%. The results confirm the prospects of using laser systems for the effective neutralisation of FPV drones, especially due to the possibility of adjusting the radiation parameters to achieve guaranteed destruction of critical components such as propellers.

**Key words:** FPV drones, drone propellers, polymeric materials, laser radiation, thermal effects, fracture, melting.

### Постановка проблеми

FPV (First Person View) дрони за останнє десятиліття отримали значний розвиток завдяки стрімкому прогресу в електроніці, акумуляторних технологіях та бездротовому зв'язку. FPV дрони широко використовуються як для спортивних перегонів, так і для відеозйомки, досліджень, моніторингу, доставки та військових цілей [1]. Здатність таких дронів передавати відеосигнал у реальному часі дозволяє операторам бачити зображення «очима» дрона, що робить їх надзвичайно ефективними у різних умовах і середовищах. Зокрема, військове застосування FPV дронів відкриває нові можливості для розвідки, спостереження та доставки малих вибухових пристроїв, що ставить перед розробниками систем протидії нові виклики [2]. Типові FPV дрони, залежно від їх призначення, можуть мати досить компактні розміри, варіюючись від мініатюрних моделей діаметром 50–100 мм до більш потужних дронів з діаметром 250–300 мм і більше. Гвинти дронів також мають широкий діапазон розмірів: від 2 дюймів (для малих дронів) до 6–7 дюймів (для більших). Залежно від завдань, гвинти можуть бути три- або чотирилопатевими. Найчастіше вони виготовляються з легких і міцних матеріалів, таких як полімери на основі нейлону, полікарбонату, вуглепластику, що забезпечує низьку вагу і високу ударостійкість. Корпуси самих дронів зазвичай виготовляють із карбону або композитних матеріалів, які забезпечують оптимальне співвідношення між міцністю та масою [3]. Зростаюча загроза використання FPV дронів у військових і терористичних операціях спонукала розробку різних систем протидії. Традиційні методи боротьби з дронами включають радіоелектронне придушення, фізичне знищення за допомогою сіток або кінетичних засобів, а також спеціалізовані радіолокаційні системи для їх виявлення [4]. Проте такі методи не завжди ефективні, особливо в умовах швидкого пересування FPV дронів та їх здатності уникати звичайних засобів перехоплення. У зв'язку з цим усе більше уваги приділяється розробці лазерної зброї як перспективного методу боротьби з дронами. Лазерні системи мають ряд переваг, серед яких висока точність, можливість миттєвої доставки енергії на віддалені об'єкти, а також відсутність необхідності у витратних боєприпасах [4–5]. При взаємодії лазерного випромінювання з FPV дронами, головною метою є виведення з ладу їх основних компонентів – гвинтів, електроніки або акумулятора. Зокрема, гвинти дрона, виконані з термочутливих матеріалів, є однією з найбільш вразливих частин до впливу лазерного випромінювання. Нагрівання гвинтів до критичної температури може призвести до їхньої деформації або повного руйнування, що миттєво виводить дрон із ладу [6]. Таким чином, лазерна зброя стає перспективним засобом боротьби з FPV дронами, надаючи змогу їх швидкого та ефективного знищення на відстані.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Були проведені кілька досліджень впливу лазерного випромінювання на гвинти дронів. Одне з них показало [6], що лопаті, виготовлені з вуглепластику або інших композитів, більш стійкі до високих температур, ніж полімерні матеріали, але вони також не є повністю захищеними від дії лазера. Лазерне випромінювання може руйнувати смолу, що з'єднує волокна, або викликати вигорання окремих вуглецевих шарів. Це призводить до зниження механічної міцності гвинта. Так при потужності лазерного випромінювання 30 кВт, діаметрі пучка 80 мм та перпендикулярному опроміненню, через 3 умовні часові одиниці з'являються перші іскри, а вже через 15 умовних часових одиниць гвинт починає руйнуватися. Нагріта частина гвинта фактично більша за площу поверхневих пошкоджень. Площа поверхневих пошкоджень у випробуванні добре корелює з видимими поверхневими пошкодженнями на гвинті.

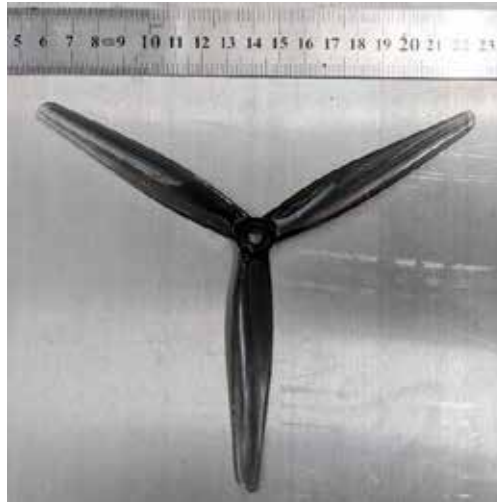
В іншому дослідженні випробовувались гвинти з полімерного матеріалу [7]. Для експериментів було обрано 2 гвинти, чорного і білого кольору з глянцевою поверхнею. Дослідження показують, що матеріали та колір пропелерів суттєво впливають на їхню стійкість до високих температур і лазерного випромінювання. Чорні пропелери поглинають більше енергії на довжині хвилі 1070 нм (до 95.8%), що робить їх вразливішими до лазерного впливу, тоді як білі лопаті поглинають лише 36.3%. Однак, при довгих хвилях лазерного випромінювання (1550 нм і 2036 нм), обидва види стають однаково сприйнятливими, оскільки їхня абсорбція зростає до 85.8%. Термодеградація полімерів починається при температурах 446°C–457°C.

### Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є вивчення поведінки гвинтів FPV-дрону з полімерних матеріалів під дією лазерного випромінювання високої потужності для визначення оптимальних параметрів руйнування цього матеріалу.

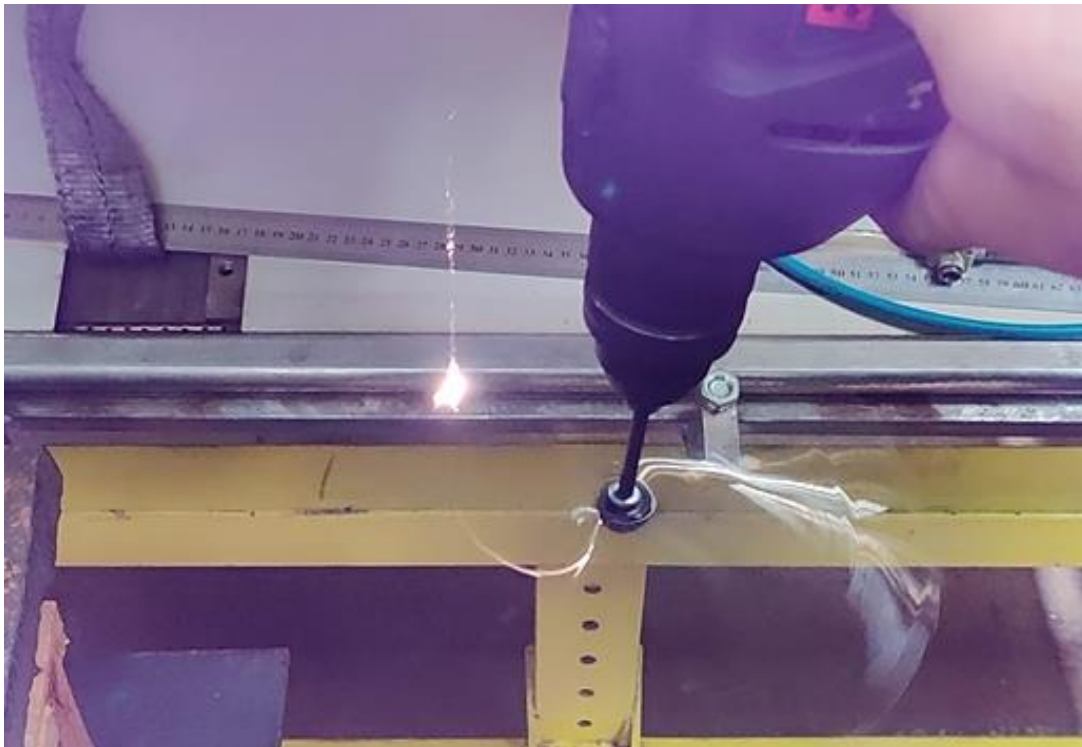
**Викладення основного матеріалу дослідження**

Для проведення досліджень використовувався Nd:YAG-лазер «DY044» з потужністю випромінювання до 4,4 кВт та довжиною хвилі випромінювання  $\lambda=1,06$  мкм, виробництва фірми «Rofin-Sinar» (виробництва Німеччини). В якості матеріалу для випробувань використовувався пропелер FPV дрона з полікарбонату діаметром 7,5 дюймів (рис. 1).



**Рис. 1. Пропелер FPV дрона з полікарбонату**

Під час випробування гвинт закріплювався в електричну дріль та обертався зі швидкістю 2000 об/хв під кутом  $90^\circ$  відносно падіння лазерного променя (рис. 2). Діаметр пучка лазерного випромінювання на пропелері становив 4...10 мм, потужність випромінювання при цьому була на рівні 2...4 кВт.



**Рис. 2. Проведення випробування вивчення з вивчення поведінки гвинтів FPV-дрону з полімерних матеріалів під дією лазерного випромінювання високої потужності**

В таблиці 1 наведено результати випробувань. Аналіз результатів випробувань дозволяє стверджувати, що часу менше 2 секунд та потужності 2 кВт недостатньо для гарантованого руйнування гвинта. Було вирішено збільшити потужність до 4 кВт та час опромінення до 1–2 с. При цих параметрах спостерігалось гарантоване руйнування матеріалу. При збільшенні діаметру лазерного променя до 10 мм, при тій же потужності 4 кВт і часу

опромінення 1с, було наявне оплавлення без руйнування, але при збільшенні часу опромінення до 2 секунд матеріал гарантовано руйнувався. При цьому глибина проплавлення була більшою, ніж при потужності 2 кВт, діаметрі променю 4 мм і часу опромінення до 1 секунди включно.

Таблиця 1

Результати випробувань

№	P, кВт	t, с	Ø променю, мм	Кут, °	Фото	Результат
1	2	0,5	4	90		Слабке оплавлення
2	2	1	4	90		Слабке оплавлення
3	4	2	4	90		Гарантоване руйнування
4	4	1	4	90		Гарантоване руйнування
5	4	1	10	90		Оплавлення без руйнування
6	4	2	10	90		Гарантоване руйнування

Для визначення потужності яку поглинає пропелер під час випробування використовувався непрохідний вимірювач потужності лазерного випромінювання калориметричного типу (рис. 3, а). На рис. 3, б показаний процес проведення експерименту з використанням вказаного вимірювача.

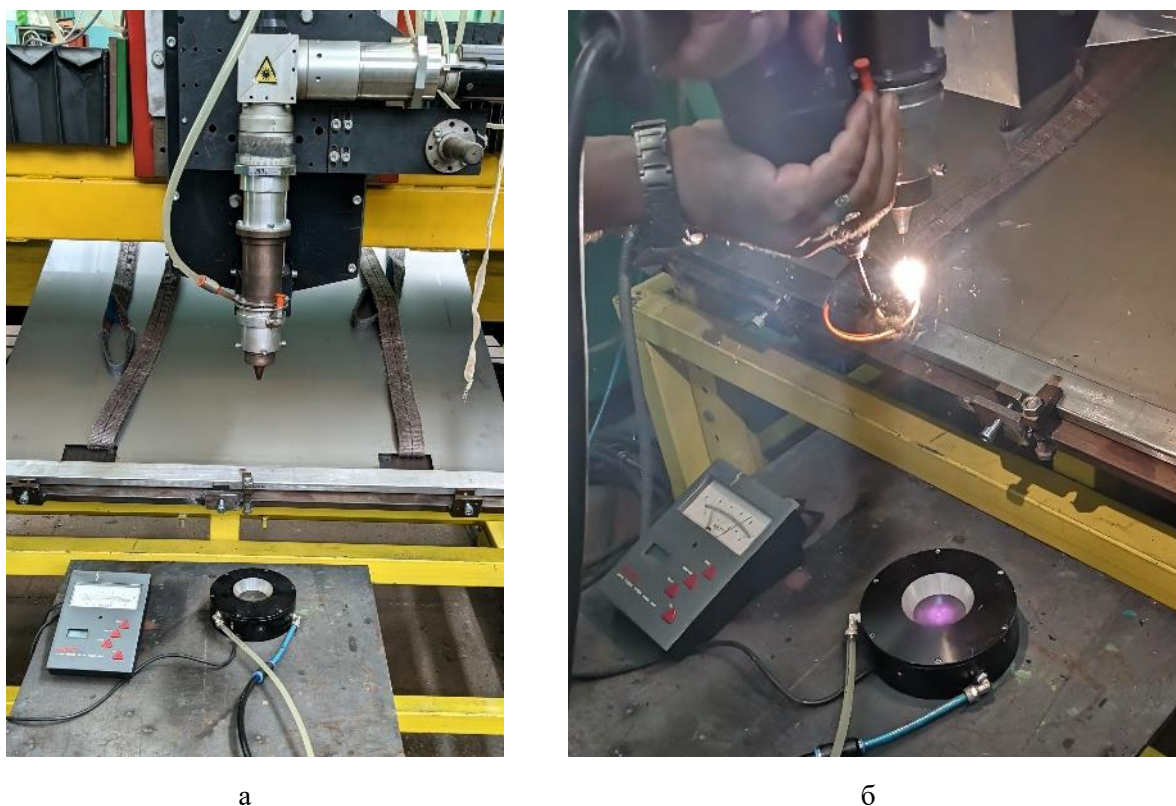


Рис. 3. Випробувальний стенд: а – загальний вигляд; б – процес проведення експерименту

За результатами вимірювань було визначено, що при генерації лазером потужності випромінювання 500 Вт, після проходження через рухомий пропелер з полікарбонату, на вимірювач потужності потрапляє приблизно 290 Вт, що становить біля 58% поглинання.

Порівняння одержаних даних з результатами експериментів інших дослідників [6, 8], дозволяє зробити висновок, що існують різні способи нанесення достатньої шкоди компонентам безпілотників, що дозволяє припинити його нормальний політ. Експерименти [8] показують, що після початку дії лазерного випромінювання на деталі безпілотників може пройти від десятих часток секунди (0,1 сек) до десятків секунд (10 сек), перш ніж буде досягнуто бажаного ефекту. Необхідний час опромінення для досягнення пошкодження, як показали експерименти [6], сильно залежить від обраного компонента мішені і конкретних матеріалів, з якого він складається. Це свідчить про те, що вибір точки прицілювання має вирішальне значення для ефективності використання лазерного випромінювання для нейтралізації дронів і що для того, щоб високоенергетичний лазер був ефективним проти безпілотників, необхідно добре розуміти слабкі місця дронів.

#### Висновки

Результати проведених досліджень показують, що для гарантованого руйнування гвинтів з полікарбонату необхідна потужність лазерного випромінювання не менше 4 кВт і час опромінення від 1 до 2 секунд. Діаметр пучка лазерного випромінювання також відіграє важливу роль: при діаметрі 4,0 мм руйнування досягається швидше, а при діаметрі 10,0 мм потрібен довший час опромінення, через більше розсіювання енергії. Оплавлення без руйнування спостерігається при коротшому часу взаємодії. Полікарбонатні лопаті поглинають близько 58% лазерного випромінювання.

**Фінансування.** Дослідження виконано за фінансової підтримки Національним фондом досліджень України проекту № 2023.04/0166 «Дослідження впливу лазерного пучка на матеріали деталей БПЛА та обґрунтування технічних параметрів лазерного обладнання мобільного комплексу для боротьби з ними» за договором грантової підтримки № 155/0166 від 01.08.2024.



## Список використаної літератури

1. Steinvall O. The potential role of laser in combating UAVs: part 2; laser as a countermeasure and weapon. *Technologies for Optical Countermeasures XVIII and High-Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects V*. 2021. Vol. 11867, P. 14-30. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2601755>
2. Kanu N. J., Gupta E., Pendkar S. M., Sakhare S. A., Munot A., Gupta V. K., Verma G. C. A few suggestions to improve anti-drone measures for combating against the drone menace. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. 2024. Vol. 105. P. 761-787. URL: <https://doi.org/10.1007/s40032-024-01047-x>
3. Chan K. W., Nirmal U., Cheaw W. G. Progress on drone technology and their applications: A comprehensive review. *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 2030. No. 1. Id. 020308. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5066949>
4. Castrillo V., Manco A., Pascarella D., Gigante G. A review of counter-UAS technologies for cooperative defensive teams of drones. *Drones*. 2022. Vol. 6, No. 3. Id. 65. URL: <https://doi.org/10.3390/drones6030065>
5. Zhao S., Xie R., Wan J. Design of anti-drone laser weapon systems. *High-Power Lasers and Applications XI*. 2020. Vol. 11544. Id. 115440A. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2575171>
6. Schleijsen R., Binsbergen S., Geljon M., Meuken D., Deiana D., Leeuwen B. 30kW laser experiments against drones. *High-Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects IV*. 2020. Id. 115390A. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2574461>
7. Allheily V., Foulon B., Couchoux M., Lefranc L.-X., Guerchoux M., Bruder C., Merlat L. Testing the vulnerability of lightweight drone propellers to high-energy laser irradiations. *High Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects VI*. 2023. Vol. 12739. Id. 1273907. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2682925>
8. Taillandier M., Peiffer R., Colomer B., Ortiz R., Chalumeau E., Pommies M. High-energy laser experiments for vulnerability studies in the context of the European TALOS program. *High-Power Lasers and Technologies for Optical Countermeasures*. 2022. Vol. 12273. P. 68-79. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2635076>

## References

1. Steinvall, O. (2021). The potential role of laser in combating UAVs: part 2; laser as a countermeasure and weapon. *Technologies for Optical Countermeasures XVIII and High-Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects V*, 11867, 14-30. <https://doi.org/10.1117/12.2601755>
2. Kanu, N. J., Gupta, E., Pendkar, S. M., Sakhare, S. A., Munot, A., Gupta, V. K., & Verma, G. C. (2024). A few suggestions to improve anti-drone measures for combating against the drone menace. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 105, 761-787. <https://doi.org/10.1007/s40032-024-01047-x>
3. Chan, K. W., Nirmal, U., & Cheaw, W. G. (2018). Progress on drone technology and their applications: A comprehensive review. *AIP Conference Proceedings*, 2030(1), 020308. <https://doi.org/10.1063/1.5066949>
4. Castrillo, V., Manco, A., Pascarella, D. & Gigante, G. (2022). A review of counter-UAS technologies for cooperative defensive teams of drones. *Drones*, 6(3), 65. <https://doi.org/10.3390/drones6030065>
5. Zhao, S., Xie, R., & Wan, J. (2020). Design of anti-drone laser weapon systems. *High-Power Lasers and Applications XI*, 11544, 115440A. <https://doi.org/10.1117/12.2575171>
6. Schleijsen, R., Van Binsbergen, S., Geljon, M., Meuken, D., Deiana, D., & van Leeuwen, B. (2020). 30 kW laser experiments against drones. *Technologies for Optical Countermeasures XVII; and High-Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects IV*, 11539, 34-44. <https://doi.org/10.1117/12.2574461>
7. Allheily, V., Foulon, B., Couchoux, M., Lefranc, L.-X., Guerchoux, M., Bruder, C., & Merlat, L. (2023). Testing the vulnerability of lightweight drone propellers to high-energy laser irradiations. *High Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects VI*, 12739, 1273907. <https://doi.org/10.1117/12.2682925>
8. Taillandier, M., Peiffer, R., Colomer, B., Ortiz, R., Chalumeau, E., & Pommies, M. (2022). High-energy laser experiments for vulnerability studies in the context of the European TALOS program. *High-Power Lasers and Technologies for Optical Countermeasures*, 12273, 68-79. <https://doi.org/10.1117/12.2635076>

**Р. О. БОНДАР**

аспірант кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: 0009-0008-9383-4130

**І. А. ГРИШКО**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: 0000-0002-5709-1359

## ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ КАВІТАЦІЇ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ ВАЖКИХ НАФТОПРОДУКТІВ

*Стаття присвячена аналізу інноваційних рішень у сфері переробки важких нафтопродуктів за допомогою ультразвукової кавітації. У роботі підкреслюються переваги методу кавітаційного гідрування порівняно з іншими технологіями переробки нафтопродуктів. Зростаюча кількість досліджень та публікацій вказує на актуальність цього питання в міжнародному науковому середовищі. Наведено приклади успішного використання кавітації для зменшення сірковмісності сирової нафти та її трансформації у легші продукти з нижчою молекулярною масою. Особлива увага приділена вітчизняним розробкам, серед яких відзначено установку для ультразвукового крекінгу вуглеводневих сполук, яка демонструє конкурентні переваги.*

*Метою статті є визначення стану розвитку технологій кавітаційного гідрування в світі та в Україні через аналіз інноваційних розробок, зареєстрованих у відповідних профільних установах. Для аналізу було використано патентні бази, такі як Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій, PATENTSCOPE та Espacenet.*

*Стаття надає детальну картину розвитку технологій впливу ультразвукової кавітації на важкі вуглеводні на основі аналізу патентних джерел, що підтверджує зростаючу популярність цієї теми у світовій науковій спільноті. Згідно з проведеним пошуком, найбільша кількість патентів у цій сфері зареєстрована в Китаї, США та Канаді. Показано, що в Україні питання переробки важких нафтопродуктів залишається відкритим, проте існують перспективні дослідження.*

*Проведений аналіз показав, що зростає кількість патентів і розробок, спрямованих на застосування кавітації в переробці важких нафтопродуктів. Технології кавітаційного гідрування набули розвитку з 1970-х років, а за останні десятиліття відбувся суттєвий прогрес. Це вказує на перспективність цього напрямку у нафтопереробній галузі, де провідну роль відіграють Китай та США.*

**Ключові слова:** кавітація, ультразвук, кавітаційне гідрування, переробка мазуту, переробка нафти, кавітаційна переробка мазуту.

**R. O. BONDAR**

Postgraduate Student at the Department of Applied Hydroaeromechanics  
and Mechatronics  
National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
ORCID: 0009-0008-9383-4130

**I. A. HRYSHKO**

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: 0000-0002-5709-1359

## ANALYSIS OF THE STATE OF INNOVATIVE SOLUTIONS IN THE FIELD OF ULTRASONIC CAVITATION'S IMPACT ON HEAVY OIL PRODUCTS

*The article is dedicated to the analysis of innovative solutions in the field of heavy oil product processing using ultrasonic cavitation. The paper emphasizes the advantages of cavitation hydrotreatment compared to other oil processing technologies. The increasing number of studies and publications indicates the relevance of this issue in the*

international scientific community. Examples of successful use of cavitation to reduce the sulfur content of crude oil and its transformation into lighter products with lower molecular weight are provided. Special attention is given to domestic developments, including the ultrasonic cracking unit for hydrocarbon compounds, which demonstrates competitive advantages.

The aim of the article is to assess the state of development of cavitation hydrotreatment technologies on both global and Ukrainian levels through the analysis of patent data. It is shown that in Ukraine, the issue of heavy oil product processing remains open, although there are promising studies. For the analysis, patent databases such as the Ukrainian National Office of Intellectual Property and Innovation, PATENTSCOPE, and Espacenet were used. According to the search, the largest number of patents in this field is registered in China, the USA, and Canada.

The analysis showed a growing number of patents and developments focused on the application of cavitation in the processing of heavy oil products. Cavitation hydrotreatment technologies have developed since the 1970s, and significant progress has been made in recent decades. This indicates the potential of this direction in the oil refining industry, where China and the USA play leading roles. The article provides a detailed picture of the development of technologies related to ultrasonic cavitation's impact on heavy hydrocarbons based on patent sources, confirming the increasing popularity of this topic in the global scientific community.

**Key words:** cavitation, ultrasonic, cavitation hydration, fuel oil processing, oil processing, cavitation fuel oil processing.

### Постановка проблеми

Стабільна енергетична система є важливим елементом сучасної країни. Найбільш поширеним джерелом енергії є нафтопродукти. Через зниження доступності легких сортів нафти та зростаючу потребу у високоефективних методах їх перетворення постає питання у застосуванні ефективної переробки важких нафтопродуктів. Також галузь нафтопереробки стикається зі значними викликами, пов'язаними з ефективністю використання природних ресурсів та впровадженням новітніх технологій для зниження негативного впливу на навколишнє середовище. Тому питання ефективної переробки важких нафтопродуктів стає все більш актуальним [1-4]. Традиційні технології переробки важких вуглеводнів потребують значних енергетичних та матеріальних ресурсів, що робить їх малоефективними в умовах сучасних ринкових та екологічних вимог [5-7].

Окрім цього, глобальні процеси енергетичної трансформації та прагнення до енергетичної незалежності стимулюють розвиток інноваційних рішень для обробки важких нафтопродуктів. Одним з таких рішень є кавітаційне гідрування, що забезпечує ефективне зменшення молекулярної маси та вмісту шкідливих домішок, таких як сірка, у важкій сирій нафті [8]. Однак, питання впровадження та масштабування таких технологій у виробничий процес в Україні та світі залишається відкритим через обмежену кількість досліджень та патентів у цій сфері, що вимагає глибшого вивчення та аналізу.

Тому, актуальним є дослідження ринку інноваційних технологій кавітаційного гідрування та визначення їх потенціалу для впровадження у нафтопереробну галузь як в Україні, так і на світовому рівні.

Метод кавітаційного гідрування важких нафтопродуктів має ряд переваг над іншими методами [8]. Тому, актуальним є питання дослідження ринку технології переробки важких нафтопродуктів за допомогою ультразвукової кавітації.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

За останні роки зросла кількість публікацій, в більшості іноземних дослідників, щодо інноваційних рішень в технологіях переробки важких нафтопродуктів. Так, в роботі Хан М Рашида «Перетворення важкої кислій сирій нафти/емульсії на легшу сиру нафту за допомогою кавітації та систем на основі фільтрації» наведено процес перетворення важкої сірковмісної сирій нафти в більш легку сиру нафту з меншим вмістом сірки і меншою молекулярною масою. Процес є низькотемпературним процесом з використанням контрольованої кавітації. Одними з важливих етапів даної технології є кавітація та фільтрація дисперсійного потоку в присутності газоподібного водню для отримання змішаного потоку, контроль кавітаційного тиску та температури кавітації під час етапу кавітації та фільтрації таким чином, щоб кавітаційний тиск підтримувався в основному в межах заздалегідь визначеного діапазону тиску, а температура кавітації підтримувалася в межах попередньо визначеного діапазону температур [9]. Про актуальність та реалізацію інноваційних рішень в галузі кавітаційного гідрування свідчить і вітчизняна розробка О.В. Войтовича «Установка для ультразвукового крекінгу вуглеводневих сполук», яка має ряд переваг у порівнянні з іншими методами переробки важких вуглеводнів [10].

### Формулювання мети дослідження

Метою є визначення стану та кількості методів переробки важких нафтопродуктів за допомогою кавітаційного гідрування в Україні та світі, базуючись на проведеному патентно-інформаційному пошуку.

### Викладення основного матеріалу дослідження

На сьогоднішній день в Україні відкрите питання енергетичної незалежності та видобуток вуглеводневого палива. Також постає питання у зміні підходів та методів в отриманні більшої кількості легких фракцій нафтопродуктів. Відповідно було проведено пошук наявних розробок та патентів в Україні. Їх кількість за запитом

«нафта та кавітація або ультразвук» в базі «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» в Україні сягає 4 (рис. 1–2).

Результати пошуку

Сортувати за: [11] + [21] + [22] + [46] +

Результати 1 - 4 з 4

**1 СПОСІБ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КРЕКІНГУ ВУГЛЕВОДНЕВИХ СПОЛУК**

Декларований патент на винахід | в кошик  | патент не діє

(11) Номер патенту:	37716 A	(51) МПК (2006):	C10G 15/00
(21) Номер заявки:	2000041976	(72) Винахідник:	Родонов Валерій Євгенович (UA); Бенгер Євген Федорович (UA)
(22) Дата подання заявки:	06.04.2000	(73) Власник:	ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПЕВРОБІДНИКІВ НАН УКРАЇНИ, 03028, м. Київ-28, просп. Науки, 45, Інститут фізики напелвродників НАН України, патентний відділ (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права:	15.05.2001		

Патент опубліковано 15.05.2001, Бол. № 4/2001

**7 СПОСІБ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КРЕКІНГУ ВУГЛЕВОДНЕВИХ СПОЛУК**

Декларований патент на винахід | в кошик  | патент не діє

(11) Номер патенту:	41575 A	(51) МПК (2006):	C10G 15/00
(21) Номер заявки:	2000074495	(72) Винахідник:	Родонов Валерій Євгенович (UA); Бенгер Євген Федорович (UA)
(22) Дата подання заявки:	26.07.2000	(73) Власник:	ІНСТИТУТ ФІЗИКИ НАПЕВРОБІДНИКІВ НАН УКРАЇНИ, 03028, м. Київ-28, просп. Науки, 45, Інститут фізики напелвродників НАН України, патентний відділ (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права:	17.09.2001		

Патент опубліковано 17.09.2001, Бол. № 8/2001

Рис. 1. Результати пошуку в базі «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» частина 1 [11]

**3 ПРИСТРІЙ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ОБРОБКИ ОРГАНІЧНИХ СПОЛУК І СИСТЕМА ДЛЯ ЗДІЙСНЕННЯ КРЕКІНГУ ОРГАНІЧНИХ СПОЛУК**

Патент України (на 20 р.) | в кошик  | патент не діє

(11) Номер патенту:	50002	(51) МПК (2006):	B01J 19/10 (2006.01); C10G 15/00
(21) Номер заявки:	2001107122	(72) Винахідник:	Прийцип Віктор Іванович (UA)
(22) Дата подання заявки:	19.10.2001	(73) Власник:	ПРИЙЦИП ВІКТОР ІВАНОВИЧ (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права:	15.10.2002		

Патент опубліковано 15.10.2002, Бол. № 10/2002

**4 УСТАНОВКА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КРЕКІНГУ ВУГЛЕВОДНЕВИХ СПОЛУК (ВУГЛЕВОДНЕВОЇ СИРОВИНИ)**

Патент на винахід

(11) Номер патенту:	92137	(51) МПК (2014.01):	C10G 3/00, C10G 7/00, C10G 37/00, C07C 15/00, C10G 15/00
(21) Номер заявки:	1201304638	(72) Винахідник:	Войтович Олександр Васильович (UA)
(22) Дата подання заявки:	12.04.2013	(73) Власник:	ВОЙТОВИЧ ОЛЕКСАНДР ВАСИЛЬОВИЧ, вул. 6 липня, 26, кв. 2, м. Ірпінь, Київська обл., 06200 (UA); ГОПІЛСВ ЮРІЙ ВАЛЕРІЙОВИЧ, вул. Молодіжна, 22, с. Муратово, Новоодарський р-н, Луганська обл., 93535 (UA); ЕЕСТЯВ ЛЕМБІТ, Kaupmehe 2-1, Tallinn 10114, Eesti (ES)
(24) Дата, з якої є чинними права:	11.08.2014		

Патент опубліковано 11.08.2014, Бол. № 15/2014

Рис. 2. Результати пошуку в базі «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» частина 2 [11]

Також було проведено аналіз патентів та винаходів у світі. Для здійснення пошуку підготовлено пошуковий запит за ключовими словами для визначення коду міжнародної патентної класифікації (МПК), згідно якого далі буде проводитись власне пошук. Як ключові слова було обрано «Cavitation hydrotreatment heavy oil», «Cavitation oil recovery method», «Cavitation technology for heavy oils», «Hydrodynamic cavitation of heavy oil products», «Ultrasonic cavitation for fuel oil», «Cavitation method for obtaining synthetic oil». Відповідно до перелічених вище ключових слів, обрано рубрику МПК:

C10G – Крекінг вуглеводневих масел: виготовлення рідких вуглеводневих сумішей, наприклад, шляхом деструктивного гідрогенізування, олігомеризування, полімеризування.

Оскільки дана рубрика включає широкий спектр методів переробки вуглеводнів, запит було сформовано наступним чином: «C10G AND heavy oil AND cavitation AND (hydrotreatment OR Hydrodynamic OR Ultrasonic)». Використовуючи патентну базу PATENTSCOPE отримано результати представлені на рисунку 3.

Згідно з аналізом проведеним у базі PATENTSCOPE, найбільша кількість патентів та винаходів за даним пошуковим запитом у Китаї – 9, США – 5 та Канаді – 3.

Country	Applicants	Inventors	IPC code	Publication Date
China	1	DUO XUDANG	C10G	2018
United States of America	1	JAMES WOOD	B01J	2018
ICT	1	NICHEL DAAGE	B01F	2017
Canada	1	JATRIK LORING HANKS	F10	2018
Russian Federation	1	SERGIY TREVIRG	C08B	2019
Mexico	1	THOMAS FRANCIS DESMAN, JR.	C10L	2020
European Patent Office	1	GALEIV VLADIMIREVICH		
		CHORNET ESTIBAN		2023
		CHORNET, MICHEL		
		DAAGE NICHEL		
		CHINA PETROLEUM AND CHEMICAL CO		
		CHORNET ESTIBAN		

Рис. 3. Кількість патентів в галузі впливу ультразвукової кавітації на важкі нафтопродукти у базі PATENTSCOPE за першим запитом [12]

Виходячи з того, що представлена вище рубрика була дуже вузькою, запит було сформовано наступним чином: «C10G AND heavy oil AND (cavitation OR hydrotreatment OR Hydrodynamic OR Ultrasonic)». Це дало значно більше результатів, що представлено на рисунку 4.

Country	Applicants	Inventors	IPC code	Publication Date
China	104	LIU TAO	C10G	2015
United States of America	44	YANG QINGHE	B01J	2016
ICT	38	HU DAMEI	C10L	2017
Japan	27	SUN SHULING	C10B	2016
Russian Federation	27	DAI LISHUN	B01D	2019
Russian Federation	17	SHAO ZHICAI	C08B	2020
Netherlands	11	WANG ZHEN	B01F	2021
Canada	11	DENG ZHONGHUO	C10C	2022
Germany	11	LIU TIEBIN	C07C	2023
European Patent Office (EPT)	11	GENG XINGUO	F10	2024
Italy	10			
	10			
	11			
	8			
	8			

Рис. 4. Кількість патентів в галузі впливу ультразвукової кавітації на важкі нафтопродукти у базі PATENTSCOPE за розширеним запитом [12]

Це дало значно більше результатів, а саме знайдено 371. Найбільша кількість патентів та розробок представлена у Китаї – 203, США – 55 та Японія – 22 (Рис. 4).

Також був проведений пошук за запитом: «C10G AND heavy oil AND (cavitation OR hydrotreatment OR Hydrodynamic OR Ultrasonic)» в базі Espacenet. В результаті отримали результат патентів у кількості 446. Відповідно був сформований представлений графік на рисунку 5.

З графіків видно, що такі технології почали розвиватись з початку 70-х років минулого століття. Зі здійсненого аналізу слідує, що існує тенденція стрімкого розвитку у дослідженні та впровадженні технологій впливу кавітації та ультразвуку на важкі нафтопродукти, що вказує на те, що дана технологія розвивається і кількість досліджень в напрямку застосування кавітації на важкі вуглеводневі сполуки зростає.

Також сформовано пошуковий запит «SPUB=(ATAC=(heavy oil AND cavitation AND (hydrotreatment OR Hydrodynamic OR Ultrasonic)) and IC=(C10G))» в комерційній базі Patbase. Результати представлені на рисунку 6.

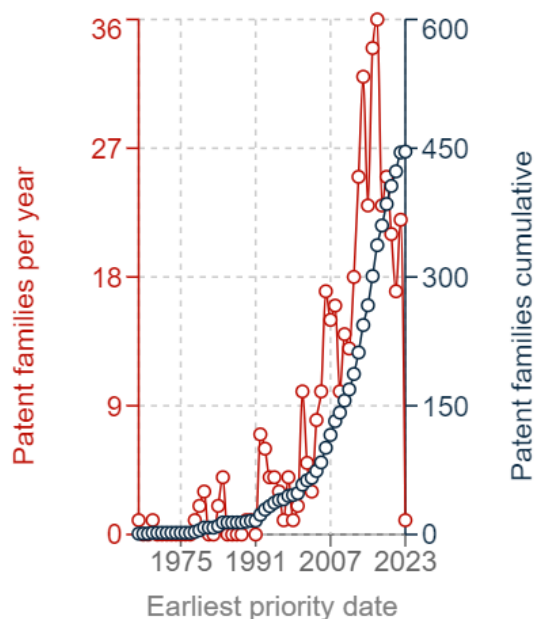


Рис. 5. Динаміка патентування рішень у галузі впливу ультразвукової кавітації на важкі нафтопродукти у світ [13]

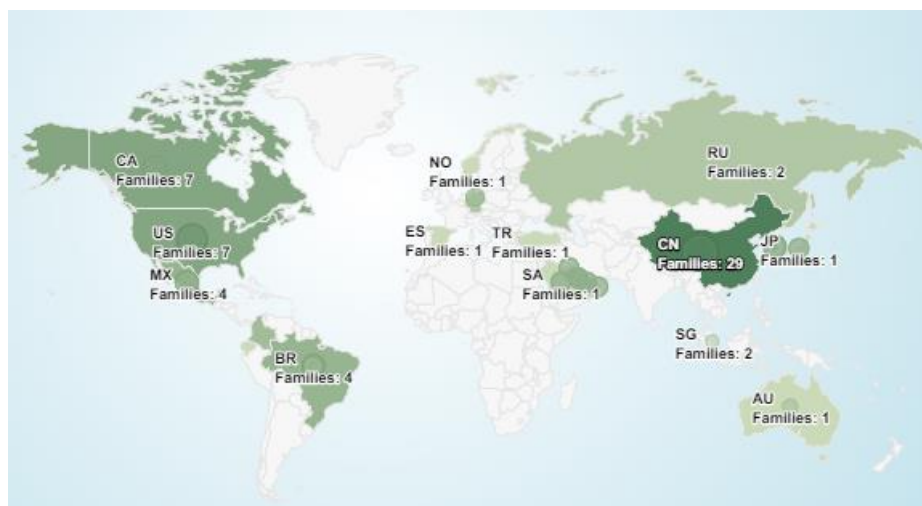


Рис. 6. Топ 20 юрисдикцій за родинами, заявами та грантами відповідно до комерційної бази Patbase [14]

Як видно з рисунку, найбільше патентних документів, таких як заявки на отримання патенту, звіти про пошук та патенти у Китаї. Також лідерами в розвитку даних технологій США та Канада.

### Висновки

Незважаючи на те, що переробка нафти є одним з вирішальних процесів у світовій економіці і кількість запасів легкої нафти зменшується з кожним роком, кількість запатентованих технологій пов'язаних з впливом ультразвукової кавітації на важкі нафтопродукти в Україні є достатньо низькою.

Виходячи з проведеного аналізу слідє, що технологія кавітаційного гідрування важких нафтопродуктів у світі з кожним роком розвивається і кількість робіт по даній темі збільшується. Відповідно до проведеного аналізу у пошукових базах видно, що лідерами в розвитку даної технології є Китай та США. Також кількість патентних робіт та винаходів розроблених у світі по темі впливу кавітації та ультразвуку на важкі вуглеводні вказує на те, що дана технологія має перспективи і в цій галузі проводиться велика кількість досліджень.

## Список використаної літератури

1. Top Lead. Довідник «Енергетика України». Київ, 2020. 30 с.
2. Мачинський О. Я., Топільницький П. І. Гідрокрекінг. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 348 с.
3. Склабінський В. І., Ляпощенко О. О., Артюхов А. Є. Технологічні основи нафто- та газопереробки: навч. посіб. / за ред. В. І. Склабінського. Суми: Сум. держ. ун-т, 2011. 187 с.
4. Саранчук В. І. Хімія і фізика горючих копалин / Ільшов М. О., Ошовський В. В., Білецький В. С. Донецьк: Схід. вид. дім, 2008. 600 с.
5. Курта С. А. Основи нафтохімії: навч. посіб. ДВНЗ «Прикарпат. нац. ун-т ім. В. Стефаника», 2020. 196 с.
6. Шевчук В. Я., Чеботько К. О., Разгуляев В. М. Біотехнологія одержання органіномінеральних добрив із вторинної сировини. Київ: ІСД МО, 2001. 214 с.
7. Білецький В. С., Бойко В. С., Букін С. Л. Мала гірнична енциклопедія. Т. 2 / за ред. В. С. Білецького. Донецьк: Донбас, 2007. 652 с.
8. Войтович О. В. Практична реструктуризація вуглеводнів та вуглеводів. Київ, 2018. 77 с.
9. Патент США № 8691083B2, 2014. Cavitation reactor for hydrotreatment of heavy oil / Lawrence W. Holbrook, Stuart I. Mitchell, Marco A. Castaneda-Zaldivar, James P. Hall, Igor S. Litvinenko, M. Rashid Khan. Опубліковано 08.04.2014.
10. Патент на корисну модель № 92137, Україна, МПК C10G 75/04. Спосіб підвищення ефективності процесу термічної переробки нафтопродуктів / Войтович О. В., Горкун Ю. В., Білецький О. О. Опубліковано 25.07.2014.
11. Державне підприємство «Український інститут інтелектуальної власності» [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=search>.
12. Всесвітня організація інтелектуальної власності. Патентна база «PATENTSCOPE» [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://patentscope.wipo.int/search/ru/result.jsf?\\_vid](https://patentscope.wipo.int/search/ru/result.jsf?_vid).
13. Патентна база «Espacenet» [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://worldwide.espacenet.com/>.
14. Патентна база «PatBase» [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.patbase.com>.

## References

1. Top Lead. (2020). *Energy of Ukraine*. Kyiv.
2. Machynskyi, O. Ya., & Topilnytskyi, P. I. (2011). *Hydrocracking*. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House.
3. Sklabinskyi, V. I., Lyaposhchenko, O. O., & Artyukhov, A. Ye. (2011). *Technological fundamentals of oil and gas processing* (V. I. Sklabinskyi, Ed.). Sumy: Sumy State University.
4. Saranchuk, V. I., Ilyashov, M. O., Oshovskiy, V. V., & Biletskyi, V. S. (2008). *Chemistry and physics of combustible minerals*. Donetsk: Skhid Publishing House.
5. Kurta, S. A. (2020). *Fundamentals of petrochemistry*. Precarpathian National University named after V. Stefanyk.
6. Shevchuk, V. Ya., Chebotko, K. O., & Razhulyayev, V. M. (2001). *Biotechnology for the production of organomineral fertilizers from secondary raw materials*. Kyiv: ISD MO.
7. Biletskyi, V. S., Boiko, V. S., & Bukin, S. L. (2007). *Small mining encyclopedia* (Vol. 2, V. S. Biletskyi, Ed.). Donetsk: Donbas.
8. Voitovych, O. V. (2018). *Practical restructuring of hydrocarbons and carbohydrates*. Kyiv.
9. Holbrook, L. W., Mitchell, S. I., Castaneda-Zaldivar, M. A., Hall, J. P., Litvinenko, I. S., & Khan, M. R. (2014). Cavitation reactor for hydrotreatment of heavy oil (US Patent No. 8691083B2). Retrieved from <https://patents.google.com/patent/US8691083B2/en>
10. Voitovych, O. V., Horkun, Yu. V., & Biletskyi, O. O. (2014). Method of increasing the efficiency of the thermal processing of oil products (Utility Model Patent No. 92137, Ukraine, IPC C10G 75/04). Retrieved from <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=search>
11. Ukrainian Institute of Intellectual Property. (n.d.). *Patent search database*. Retrieved from <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=search>
12. World Intellectual Property Organization. (n.d.). *Patent database "PATENTSCOPE"*. Retrieved from [https://patentscope.wipo.int/search/ru/result.jsf?\\_vid](https://patentscope.wipo.int/search/ru/result.jsf?_vid)
13. Patent Database "Espacenet". (n.d.). *Patent search database*. Retrieved from <https://worldwide.espacenet.com/>
14. Patent Database "PatBase". (n.d.). *Patent search database*. Retrieved from <https://www.patbase.com/>

Ю. О. ВОВК

аспірантка кафедри хімії та хімічної технології  
Національний авіаційний університет  
ORCID: 0000-0002-1337-3485

Д. А. ПЕТРУК

бакалавр кафедри хімії та хімічної технології  
Національний авіаційний університет  
ORCID: 0009-0001-9450-2620

## СТІЙКІСТЬ БІОДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА ДО МІКРОБІОЛОГІЧНОГО УРАЖЕННЯ

Проведено оцінку мікробіологічної деструкції біодизельного пального під час експлуатації та її впливу на конструкційні матеріали. Пошук відновлювальних, стійких та екологічно чистих альтернатив нафтовому дизельному паливу викликав зростаючий інтерес до виробництва та використання біодизельного пального. Однак, біодизельне паливо, завдяки своєму хімічному складу, є дуже уразливим до мікробіологічного ураження, що спричинює його біологічну деградацію. У цій роботі систематизовано значний асортимент мікроорганізмів, виявлених у біодизельному паливі. Показано, що основною перешкодою для його широкого застосування є висока біорозкладність, у порівнянні із дизельним паливом, низька стійкість до мікробіологічного ураження та корозійність, що можуть суттєво знижувати якість пального. Також варто зазначити що концентрація біодизельного палива впливає на біохімічні процеси та життєдіяльність мікроорганізмів. Це важливо для розуміння взаємодії біодизеля з мікробним середовищем і процесу корозії. Експериментально підтверджено, що мікроорганізми можуть активно розвиватися та розмножуватися у дизельному паливі, порушуючи його стійкість та сприяючи його біодеградації, формуванню біоплівки на межі паливно-водяної фази, продукуванню механічних забруднень, які засмічують фільтри та можуть прискорювати корозію технологічного обладнання. Продукти життєдіяльності мікроорганізмів призводять до зміни pH паливного середовища. Крім того, процес мікробіологічного ураження вуглеводнів супроводжується утворенням корозійноактивних сполук, що неминуче призводить до руйнування конструкційних матеріалів і формування шкідливих сполук, продуктів зносу, знижує рівень раціонального використання палива. Впровадження та використання біодизельного палива, як заміна традиційного, є перспективним, але покращення стійкості до мікробіологічного ураження і схильність до корозії такого палива є нагальною проблемою, яка потребує безпосередньої оцінки та подальшого вирішення.

**Ключові слова:** біодизель, палива, мікробіологічне ураження, мікроорганізми, корозія, окислення, зношування, стійкість, екологічна безпека.

YU. O. VOVK

Postgraduate Student at the Department of Chemistry  
and Chemical Technology  
National Aviation University  
ORCID: 0000-0002-1337-3485

D. A. PETRUK

Bachelor at the Department of Chemistry and Chemical Technology  
National Aviation University  
ORCID: 0009-0001-9450-2620

## RESISTANCE OF BIODIESEL FUEL TO MICROBIOLOGICAL CONTAMINATION

An assessment of the microbial degradation of biodiesel during operation and its impact on structural materials has been conducted. The search for renewable, sustainable, and environmentally friendly alternatives to petroleum diesel has led to growing interest in the production and use of biodiesel. However, due to its chemical composition, biodiesel is highly vulnerable to microbial contamination, resulting in biological degradation. This study systematically catalogs a significant variety of microorganisms found in biodiesel. It demonstrates that the main barrier to its widespread use is its high biodegradability compared to diesel fuel, along with its low resistance to microbial contamination and corrosiveness, which can significantly reduce fuel quality.

It is also important to note that the concentration of biodiesel affects biochemical processes and the vitality of microorganisms. This is crucial for understanding the interaction of biodiesel with the microbial environment and the corrosion process. Experimental evidence confirms that microorganisms can actively grow and multiply in diesel fuel, undermining its stability



and promoting its biodegradation, the formation of biofilms at the fuel-water interface, and the production of mechanical contaminants that clog filters and may accelerate the corrosion of technological equipment. The metabolic byproducts of microorganisms lead to changes in the pH of the fuel environment. Furthermore, the microbial degradation of hydrocarbons is accompanied by the formation of corrosion-active compounds, which inevitably leads to the destruction of structural materials and the formation of harmful compounds, resulting in wear products that decrease the efficient use of fuel.

The introduction and use of biodiesel as a replacement for traditional fuel is promising, but improving its resistance to microbial contamination and susceptibility to corrosion is an urgent issue that requires direct assessment and further resolution.

**Key words:** biodiesel, fuel, microbiological damage, microorganisms, corrosion, oxidation, wear, sustainability, environmental safety.

### Постановка проблеми

Пошук відновлювальних, стійких та екологічно чистих альтернатив дизельному паливу нафтового походження призвів останнім часом до підвищення зацікавленості щодо виробництва та використання біодизельного палива, але біорозкладність і схильність до корозії такого палива є нагальною проблемою, яка потребує безпосередньої оцінки та вирішення. Біодизельне паливо є дуже «біоактивним», завдяки своєму хімічному складу, основною складовою якого є метилові ефіри жирних кислот, гігроскопічним властивостям та вмісту високої концентрації кисню, що створює сприятливі умови для біологічної деградації біодизельного палива та активному росту мікроорганізмів у паливних системах, резервуарах для зберігання та ємностях для транспортування. Спільноти мікроорганізмів, включаючи бактерії, грибки та дріжджі, можуть активно розвиватися та розмножуватися у біодизельному паливі, порушуючи його стійкість та сприяючи його біодеградації, формуванню біоплівки на межі паливно-водяної фази, продукуванню механічних забруднень, які можуть засмічувати фільтри та прискорювати корозію металевих поверхонь у резервуарах для зберігання біодизельного палива.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Мікробіологічне ураження паливних систем транспорту – це добре відоме явище. Основною особливістю розвитку цього типу забруднення є здатність мікроорганізмів активно рости та розвиватися, використовуючи органічні речовини як джерело карбону для їхнього метаболізму [1]. Перші випадки пошкодження вуглеводневих палив були зафіксовані ще в останнє десятиліття XIX століття [2, 3].

Забруднення спричинене мікроорганізмами є характерною особливістю не лише для конкретного типу палива, до нього схильні такі види, як дизельне паливо, бензин, біодизельне паливо, пальне для морського, авіаційного та автомобільного транспорту. Керосин, а також середні дистилати, отримані шляхом переробки нафти, особливо вразливі до мікробіологічної деградації [4], оскільки вуглеводневі ланцюги C<sub>10</sub>–C<sub>18</sub> легко використовуються мікроорганізмами як джерело карбону. Швидкість процесу та ступінь мікробіологічного ураження обумовлюється вуглеводневим складом палива [5]:

*лінійні вуглеводні > розгалужені вуглеводні > ароматичні вуглеводні.*

Основним підґрунтям мікробіологічного ураження біодизельного палива є потрапляння до нього мікроміцетних грибів, дріжджів, бактерій та водоростей [6]. Усі перелічені організми присутні в навколишньому середовищі, тому вони легко можуть втручатися до всіх етапів ланцюга постачання палива. Основними складовими, які необхідні для існування мікробів є: вода – як необхідне середовище для життя, паливо – як важливе джерело живлення та кисень – як необхідний елемент для росту. Таблиця наведена нижче (табл. 1), демонструє деяких представників мікроорганізмів, що здатні до біодеградації нафтопродуктів. Основні представники мікроорганізмів, що спричиняють біодеградацію палив [7].

Таблиця 1

Мікроорганізми, що спричиняють старіння палива

Гриби	Дріжджі	Водорості	Бактерії
<i>Verticillium</i>	<i>Cryptococcus</i>	<i>Agmenellum spp</i>	<i>Streptomyces</i>
<i>Varicospora Penicillium</i>	<i>Candida Debaryomyces</i>	<i>Chlorella sorokiniana</i>	<i>Sphingomonas paucimobilis</i>
<i>Luhworthia</i>	<i>Hansenula</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>	<i>Rhodococcus spp.</i>
<i>Gliocladium</i>	<i>Pichia</i>	<i>Oscillatoria</i>	<i>Pseudomonas</i>
<i>Achremonium sp Aspergillus</i>	<i>Trichosporon</i>	<i>Selenastrum capricornutum</i>	<i>Mycobacterium spp.</i>
<i>Bjerkandera adusta</i>	<i>Torulopsis</i>	<i>Pseudomonas migulae</i>	<i>Flavobacterium</i>
<i>Cunninghamella</i>	<i>Sporobolomyces</i>	<i>Sphingomonas yanoikuyae</i>	<i>Corynebacterium</i>
<i>Corollasporium Cladosporium</i>	<i>Saccharomyces</i>	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	<i>Burkholderia</i>
<i>Dendryphiella</i>	<i>Rhodotorula</i>		<i>Brevibacterium</i>
<i>Fusarium</i>	<i>Yarrowia</i>		<i>Bacillus</i>
			<i>Alcaligenes</i>
			<i>Haemophilus spp.</i>
			<i>Paenibacillus spp.</i>

Найбільшу загрозу для експлуатації біодизельного палива ураженим переліченими мікроорганізмами становлять ниткоподібні мікроміцети, що пов'язано з їх здатністю утворювати в результаті метаболізму агресивні побічні продукти, а їх міцелій може засмічувати елементи паливної системи, зокрема насоси та фільтри. Певні види бактерій та грибів, які зустрічаються у паливі, як правило, мають малі розміри (1–2 мкн), використовуючи при цьому вуглеводні та присадки, що додаються до біодизельного палива, в якості джерела їжі. Завдяки цьому вони активно та швидко розмножуються, утворюючи при цьому мулоподібну речовину як побічний продукт.

Під час метаболізму мікроорганізмів у біодизельному паливі в результаті можуть утворюватися різноманітні побічні продукти, продукування яких може змінюватися в залежності від виду мікроорганізмів та умов поживного середовища, в тому числі органічні кислоти, гази ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  та  $\text{CO}_2$ ) та енергетичні речовини: адезинотрифосфат (АТФ), ацетил-кофермент А (ацетил-КоА). Представлені продукти метаболізму мікроорганізмів є важливими для розуміння впливу мікробіологічного ураження на стійкість біодизельного палива.

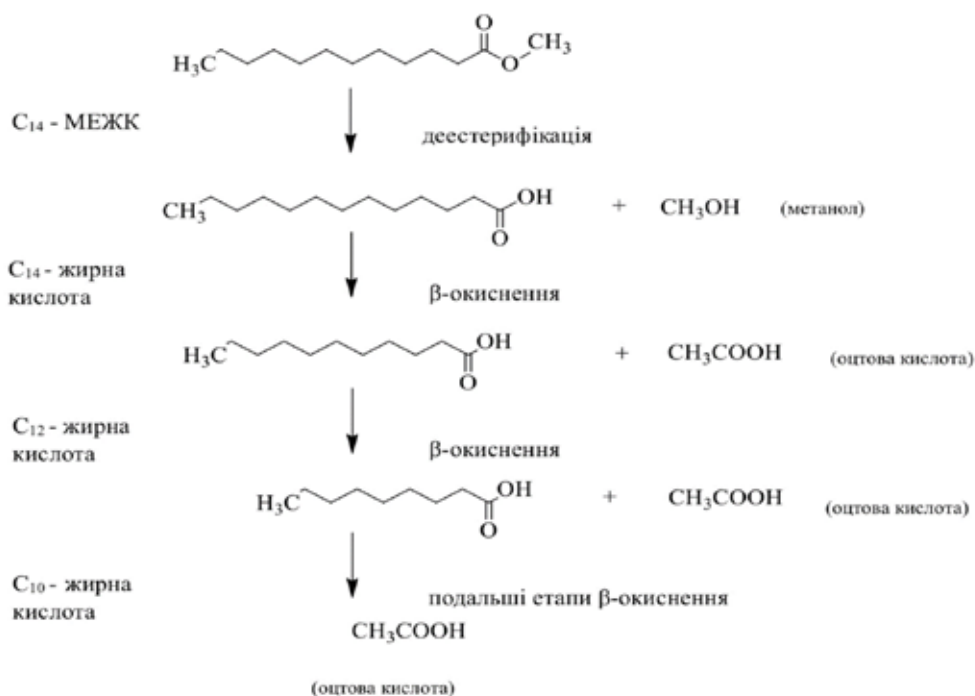


Рис. 1. Біодеградація метилових ефірів жирних кислот (МЕЖК), спричинена мікроорганізмами

Відомо, що біодеградація біодизельного палива спричинена впливом мікроорганізмів. МЕЖК є природними продуктами, оскільки основною складовою є жирні кислоти, отримані з рослинних та тваринних жирів, тому численні мікроорганізми, що живуть у ґрунті та ґрунтових водах, можуть їх засвоювати та метаболізувати. Біодеградація молекул МЕЖК – це складний процес, що складається з кількох послідовних етапів, і цей процес перебігає подібно в аеробних і анаеробних умовах (рис. 1). Спочатку відбувається деестерифікація молекул МЕЖК з утворенням ВЖК та метанолу. Надалі ВЖК здійснюється поступове відокремлення двовуглеводневих компонентів за допомогою процесу – β-окиснення, в результаті з утворенням мурашиної та оцтової кислоти. Вивільнений метанол легко біологічно розкладається в будь-яких умовах [8,9].

Забезпечення стійкості біодизельного палива під час всіх етапів його постачання є одним з критично важливих питань. Для деяких практичних користувачів термін зберігання біодизельного палива обмежений чотирма тижнями – чотирма місяцями, що значною мірою залежить від початкової стабільності зберігання самого палива. Встановлено, що швидкість біодеградації біодизельного палива в п'ять разів вища, ніж у дизельного палива.

Silva та ін. виявили, що МЕЖК, отримані з ріпакової, соняшникової та соєвої олії повністю розкладаються протягом 28 днів [10].

Внаслідок накопичення анаеробних та аеробних мікроорганізмів у паливі відбувається:

- суттєве погіршення показників якості та властивостей палива;
- утворення осаду, що забруднює біодизельне паливо;
- утворення біоплівки, яка в подальшому призводить до розвитку корозії металевих поверхонь теологічного обладнання, резервуарів, трубопроводів та ємностей для транспортування; до закупорення фільтрів і порушення роботи насосів;

– зміни фізико-хімічних властивостей захисних матеріалів, що призводить до зниження їх міцності, еластичності і втрати основної функції – захисту [11].

Таким чином, основною перешкодою для масштабного застосування біодизельного палива є його схильність до біорозкладності та низька стійкість до мікробіологічного ураження, що може суттєво вплинути на його якість.

**Формулювання мети дослідження**

Метою роботи є оцінка мікробіологічної деструкції біодизельного палива в процесі експлуатації та вплив на конструкційні матеріали.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

На основі оброблених експериментальних даних досліджень [1–14] було виявлено значний асортимент мікроорганізмів, в тому числі бактерій, грибків, плісняви та дріжджів у чистому біодизельному паливі (B100), його сумішах з дизельним паливом і в самому дизельному паливі. Детальний систематизаційний аналіз, проведений нами, показав, що найбільш розповсюдженими мікроорганізмами, виявленими у біодизельному паливі є: *Serratia marcescens*, *Pseudallescheria boydii*, *Candida lipolytica*, *Meyerozyma guilliermondii*, *Bacillus megaterium* та *Pseudomonas aeruginosa*.

Вода у будь-якому виді палива є невід’ємною його частиною, і знаходиться у ньому як у вільному так і в розчиненому стані, що в основному залежить від температури. Зниження температури призводить до виділення фази вільної води, яка осідає на днищі резервуарів для зберігання та ємностей для транспортування, спричиняючи корозію та погіршуючи міцність конструкційних матеріалів технологічного обладнання. Підвищення температури збільшує можливість помутніння палива через поглинання води (розчинена вода у паливі переходить у «вільний стан» за рахунок температурних фазових переходів). Позбутися води повністю практично неможливо, навіть не значна концентрація води у паливі може сприяти росту мікроорганізмів, і цього майже неможливо уникнути в реальних умовах зберігання та експлуатації палива, зокрема в паливних баках.

Мікробіологічне забруднення може сприяти також передчасному «старінню» палива: поглинання і послідовний метаболізм n-алканів, інтенсифікація окиснювальних процесів, підвищений вміст сірки, зростаючий показник кислотності палива, тощо. Надходження органічних кислот у палива, можна пояснити як результат життєдіяльності мікроорганізмів. Зазвичай корозійні зміни спричинюють такі складові палива та продукти життєдіяльності мікроорганізмів як сполуки сірки, органічні кислоти а також водорозчинні неорганічні кислоти та основи. Серед перелічених сполук найбільш агресивними, є активні сполуки сірки (наприклад, вільна сірка, сірководень), особливо в присутності води. Більш детально це питання висвітлено було нами у попередніх дослідженнях [11–13].

Збільшення температури навколишнього середовища під час зберігання палива вочевидь порушує хімічну рівновагу біодизельного палива, що в свою чергу сприяє прискоренню процесів окиснення, полімеризації та конденсації, збільшуючи густину та в’язкість і, таким чином, погіршуючи якість палива в результаті зміни цих фізико-хімічних властивостей. Відповідно збільшення температури у теплий період року інтенсифікує продукування мікробіологічного забруднення палива, що може впливати на його фізико-хімічні властивості та призводити до негативних наслідків для його експлуатації в паливній системі транспортного засобу і на обладнанні підприємств паливозабезпечення (табл. 2).

Мікроорганізми мають специфічну властивість використовувати біодизельне паливо як єдине джерело карбону та енергії для свого метаболізму, продукуючи, при цьому екстрацелюлярні полімерні речовини (ЕПР), які більш відомі як «біоплівка», та інші метаболіти, які змінюють стан оточуючого середовища. Це, в свою чергу, сприяє корозійним процесам на металевих поверхнях технологічного обладнання, спричиняючи їхнє окиснення.

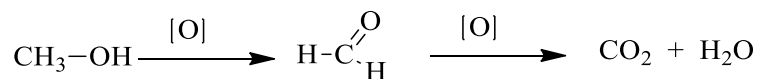
Таблиця 2

**Модифікація властивостей біодизельного палива внаслідок біологічної активності**

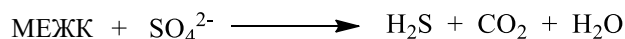
Зміна властивостей	Причина зміни	Наслідки
Збільшення кислотного числа	окиснення, гідроліз	– підвищена корозія елементів технологічного обладнання, двигуна – погіршення якості палива
Збільшення в’язкості	утворення біоплівок та полімерних речовин, внаслідок окиснення та полімеризації палива	– вплив на ефективність розпилення палива в дизельному двигуні, що безпосередньо впливає на процес згоряння
Збільшення вмісту води	утворення умов для продуктивного росту мікроорганізмів	– активне продукування колоній мікроорганізмів, мікробіологічних відкладень, що забивають фільтри і впливають на працездатність паливної системи; – підвищена корозія, – погіршення повноти згоряння біодизельного палива
Зниження температури застигання	формування біоплівок	– проблеми з запуском в холодну пору року
Зниження окиснювальної стабільності	окиснення та деструкція палива мікроорганізмами	– утворення шламу; – скорочення терміну служби фільтрів, – засмічення форсунок

Біоплівки зазвичай розвиваються у вигляді постійних шарів, відкладень і агрегатів. Незалежно від того, чи ростуть вони у вигляді постійного шару, відкладення чи агрегату.

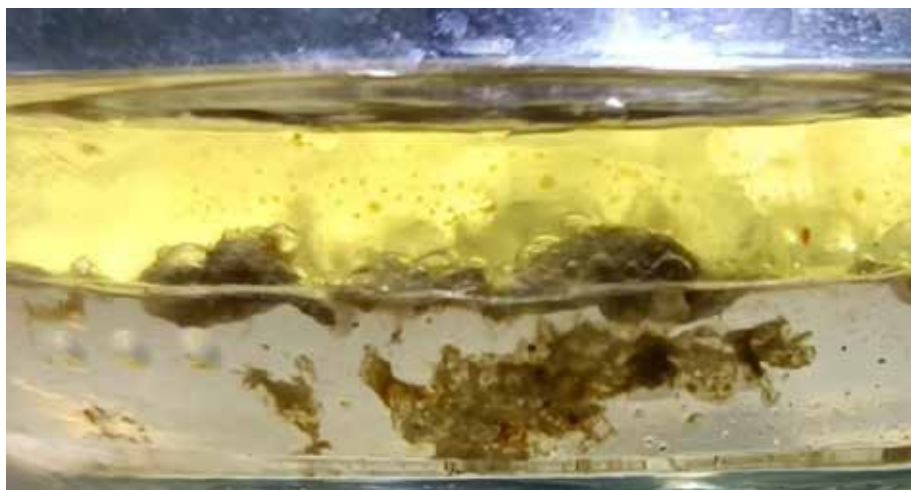
Під час утворення біоплівок на паливно-водній межі мікроорганізми у процесі свого метаболізму можуть виділяти різноманітні гази, зокрема метан, сірководень та вуглекислий газ. Вуглекислий газ може утворюватися в результаті біодеградації МЕЖК мікроорганізмами, під час якої на одному з етапів відбувається вивільнення метанолу, який внаслідок аеробного дихання мікроорганізмів легко біологічно розкладається до  $\text{CO}_2$  шляхом, подібним до окиснення:



Також,  $\text{CO}_2$  може утворюватися в процесі біологічного відновлення сульфатів ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) сульфатвідновлювальними бактеріями, які використовують сульфати як акцептори електронів у своєму анаеробному диханні. Процес можна продемонструвати нижче наведеною хімічною реакцією:



Різні фактори, такі як види мікроорганізмів, морфологія поверхні, хімічний склад середовища по-різному впливають на формування біоплівок на поверхні матеріалу. Проведені нами дослідження формування біоплівки при мікробіологічному забрудненні дизельного палива підтвердили активне продукування у даному шарі газу з 7-го по 21 день експерименту (рис. 2).



**Рис. 2.** Продукування газових пухирців внаслідок життєдіяльності біоплівки на водно-паливному шарі дизельного палива. Фото: О. Матвєєва, Ю. Вовк

Варто зазначити, що побічні продукти життєдіяльності мікроорганізмів, які називають продуктами метаболізму, можуть як прискорювати (кислі метаболіти), так і сповільнювати корозійні процеси, або взагалі не впливати ніяким чином на процес, слугуючи лише джерелом енергії для корозійно-агресивних мікроорганізмів. Механізм перебігу мікробіологічної корозії детально розглянутий у попередніх дослідженнях авторів [12], де показано, що результатом життєдіяльності мікробіологічних забруднень палив (бактерії, гриби) стає надходження небажаних сполук ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), ( $\text{CH}_2\text{O}_2$ ), ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ ), ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ )<sub>n</sub>. Це призводить до зміни рН паливного середовища, що, в свою чергу, посилює корозію технологічного обладнання. Крім того, процес окиснення пального супроводжується утворенням корозійноактивних сполук, що неминуче призводить до руйнування конструкційних матеріалів і формування шкідливих сполук, які негативно впливають на якість пального.

Проведений нами узагальнюючий систематизаційний аналіз експериментальних даних досліджень [14] впливу концентрацій біокомпонента у дизельному паливі на стійкість до мікробіологічного ураження (рис. 3) підтвердив продукування кислотних продуктів життєдіяльності мікроорганізмів а також показав часовий проміжок активності дії мікробіологічного ураження палива, залежність його інтенсивності від відсотка наявного біокомпонента (B15 – 15% біокомпонента; B20 – 20% біокомпонента; B30 – 30% біокомпонента; B100 – 100% біокомпонента).

Найвищі концентрації кислих метаболітів на 20 день спостерігаються в паливних сумішах з високим вмістом біокомпоненту, а саме B30 (0,00185 моль/л) і B100 (0,0025 моль/л). За наявності високих концентрацій кислих метаболітів мікроорганізми можуть переходити у фазу загибелі або поширюватися через розчинення біоплівки.

Тому концентрація біодизельного палива впливає на біохімічні процеси та життєдіяльність мікроорганізмів. Це важливо для розуміння взаємодії біодизеля з мікробним середовищем і процесу корозії.

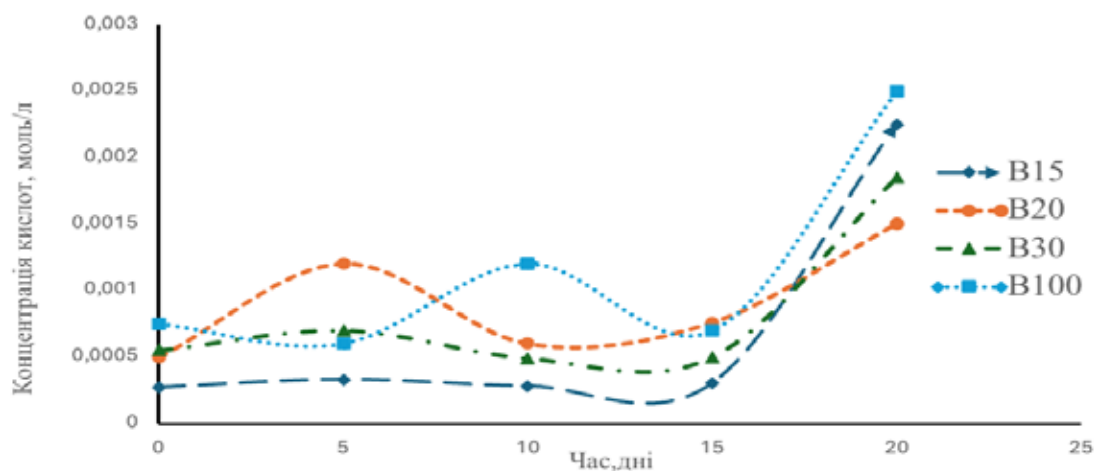


Рис. 3. Зміна концентрацій кислих метаболітів в біоплівці *Bacillus megaterium*, період 20 днів

#### Висновки

На основі експериментальних даних закордонних досліджень було систематизовано значний асортимент мікроорганізмів, виявлених у біодизельному паливі, показано, що найбільше розповсюдженими з яких є: *Serratia marcescens*, *Pseudallescheria boydii*, *Candida lipolytica*, *Meyerozyma guilliermondii*, *Bacillus megaterium* та *Pseudomonas aeruginosa*.

Основною перешкодою для широкого застосування біодизельного палива є його висока біорозкладність, у порівнянні із дизельним паливом, низька стійкість до мікробіологічного ураження та корозійності, що можуть суттєво знижувати якість палива. Значення відсоткового вмісту у паливних сумішах біокомпоненту до 20%, спричиняє зростання кількості колоній мікроорганізмів, що призводить до погіршення фізико-хімічних властивостей палив, зокрема кислотності. Це, в свою чергу, може суттєво вплинути на інтенсивність корозії технологічного обладнання.

Процес мікробіологічного ураження вуглеводнів супроводжується утворенням корозійноактивних сполук, що неминуче призводить до руйнування конструкційних матеріалів і формування шкідливих сполук, продуктів зносу, знижує рівень раціонального використання палив.

Таким чином, впровадження та використання біодизельного палива, як заміна традиційного, є перспективним, але покращення стійкості до мікробіологічного ураження і схильність до корозії такого палива є нагальною проблемою, яка потребує безпосередньої оцінки та подальшого вирішення.

#### Список використаної літератури

- Ching, T. H., Yoza, B. A., Wang, R., Masutani, S., Donachie, et al. Biodegradation of biodiesel and microbiologically induced corrosion of 1018 steel by *Moniliella wahieum* Y12. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016. 108, p. 122-126.
- Miyoshi, Manabu. Die durchbohrung von membranen durch pilzfäden. 1895.
- Passman, Frederick J. Fuel and Fuel System Microbiology – Fundamentals, Diagnosis, and Contamination Control. ASTM International, 2003.
- Dzięgielewski, W., & Sarniecki, J. Discussion on microbial contamination of naval fuels. *Polish Maritime Research*, 2009. 16(3), p. 41-44.
- Shapiro, T., Chekanov, K., Alexandrova, A., Dolnikova, G., et al. Revealing of non-cultivable bacteria associated with the mycelium of fungi in the kerosene-degrading community isolated from the contaminated jet fuel. *Journal of Fungi*, 2021. 7(1), 43.
- Varjani, S. J. Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource technology*, 2017. 223, 277-286.
- Adedeji, J. A., Tetteh, E. K., Opoku Amankwa, M., Asante-Sackey, D., Ofori-Frimpong et al. Microbial bioremediation and biodegradation of petroleum products—A mini review. *Applied Sciences*, 2022. 12(23), 12212.

8. Imron, M. F., Kurniawan, S. B., Ismail, N. I., & Abdullah, S. R. S. Future challenges in diesel biodegradation by bacteria isolates: a review. *Journal of Cleaner Production*, 2020. 251, 119716.
9. Thomas, A. O., Leahy, M. C., Smith, J. W., & Spence, M. J. Natural attenuation of fatty acid methyl esters (FAME) in soil and groundwater. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 2017. 50(3), 301-317.
10. Da Silva, G. S., Rezende, R. P., Romano, C. C., Dias, J. C. T., Marques, et al. An outlook on microbial behavior: Mimicking a biodiesel (B100) spill in sandy loam soil. *Fuel*, 2019. 235, 589-594.
11. O. Matvyeyeva, Y. Vovk, O. Nilov. Microbiological Contamination of Motor Fuels: Analysis and Identification in Fuelling Companies. *Proceedings of the National Aviation University*. 2021. 1(86). 49-56. <https://doi.org/10.18372/2306-1472.86.15444>
12. Вовк Ю. О., Матвеева О.Л. Біоушкодження палив та об'єктів підприємств паливозабезпечення // *Наукоєм. технології*. 2023. № 1. 86-92. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.57.17448>
13. Вовк Ю.О., Матвеева О.Л. Зміна якості дизельного палива в умовах довготривалого зберігання. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2024. 337(3(2)), 40-45. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-5>
14. Pusparizkita, Y. M., Harimawan, A., Devianto, H., & Setiadi, T. Effect of bacillus megaterium biofilm and its metabolites at various concentration biodiesel on the corrosion of carbon steel storage tank. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 2022. 12(4), 5698-5708.

### References

1. Ching, T. H., Yoza, B. A., Wang, R., Masutani, S., Donachie, et al. (2016). Biodegradation of biodiesel and microbiologically induced corrosion of 1018 steel by *Moniliella wahieum* Y12. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 108, p. 122-126.
2. Miyoshi, Manabu.(1895). Die durchbohrung von membranen durch pilzfäden.
3. Passman, Frederick J. (2003). *Fuel and Fuel System Microbiology – Fundamentals, Diagnosis, and Contamination Control*. ASTM International.
4. Dzięgielewski, W., & Sarnecki, J. 2009. Discussion on microbial contamination of naval fuels. *Polish Maritime Research*. 16(3), p. 41-44.
5. Shapiro, T., Chekanov, K., Alexandrova, A., Dolnikova, G., et al. (2021). Revealing of non-cultivable bacteria associated with the mycelium of fungi in the kerosene-degrading community isolated from the contaminated jet fuel. *Journal of Fungi*. 7(1), 43. DOI: <https://doi.org/10.3390/jof7010043>
6. Varjani, S. J. (2017). Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource technology*. 223, 277-286.
7. Adedeji, J. A., Tetteh, E. K., Opoku Amankwa, M., Asante-Sackey, D., Ofori-Frimpong et al. (2022). Microbial bioremediation and biodegradation of petroleum products—A mini review. *Applied Sciences*. 12(23), 12212.
8. Imron, M. F., Kurniawan, S. B., Ismail, N. I., & Abdullah, S. R. S. (2020). Future challenges in diesel biodegradation by bacteria isolates: a review. *Journal of Cleaner Production*. 251, 119716.
9. Thomas, A. O., Leahy, M. C., Smith, J. W., & Spence, M. J. (2017). Natural attenuation of fatty acid methyl esters (FAME) in soil and groundwater. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 50(3), 301-317.
10. Da Silva, G. S., Rezende, R. P., Romano, C. C., Dias, J. C. T., Marques, et al. (2019). An outlook on microbial behavior: Mimicking a biodiesel (B100) spill in sandy loam soil. *Fuel*. 235, 589-594.
11. O. Matvyeyeva, Y. Vovk, O. Nilov. (2021). Microbiological Contamination of Motor Fuels: Analysis and Identification in Fuelling Companies. *Proceedings of the National Aviation University*. 1(86). 49-56. <https://doi.org/10.18372/2306-1472.86.15444>
12. Vovk Y., Matvyeyeva O.(2023). Biouшкодження palyv ta ob"yektiv pidpryyemstv palyvozabezpechennya. *Science-based technologies*. 57(1):86-92. DOI: 10.18372/2310-5461.57.17448
13. Vovk Y.O., Matveeva O.L. (2024). Change in the quality of diesel fuel under conditions of long-term storage. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 337(3(2)), 40-45. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-5>
14. Pusparizkita, Y. M., Harimawan, A., Devianto, H., & Setiadi, T. (2022). Effect of bacillus megaterium biofilm and its metabolites at various concentration biodiesel on the corrosion of carbon steel storage tank. *Biointerface Research in Applied Chemistry*. 12(4), 5698-5708. DOI:10.33263/BRIAC124.56985708

**В. І. ВОРОБІЙОВА**

доктор технічних наук, доцент,  
завідувач кафедри фізичної хімії  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: 0000-0001-7479-9140

**М. І. СКИБА**

доктор технічних наук, доцент,  
професор кафедри екології та технології неорганічних речовин  
ДВНЗ «Український державний університет науки і технологій»  
ORCID: 0000-0003-4634-280X

**А. С. МОЩЕНКО**

аспірантка кафедри фізичної хімії  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: 0000-0002-6933-4573

## ДОБІР КОМПОНЕНТІВ ДЛЯ СИНТЕЗУ НОВИХ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ЕВТЕКТИЧНИХ РОЗЧИННИКІВ НА ОСНОВІ КВАНТОВО-ХІМІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У роботі представлено дослідження процесу добору компонентів для синтезу нових низькотемпературних евтектичних розчинників на основі квантово-хімічного моделювання. Основна увага приділена використанню напівемпіричних методів та теорії функціональної густини для оцінки реакційної здатності та передбачення міжмолекулярної взаємодії потенційних компонентів. Визначено ключові квантово-хімічні параметри, такі як енергії ВЗМО та НВМО, електронегативність, жорсткість і м'якість молекул ряду органічних кислот, що дозволяє оптимізувати процес вибору складових для синтезу новітніх розчинників. Серед досліджуваних органічних кислот малеїнова кислота виявляє найвищу реакційну здатність завдяки низькому енергетичному зазору (-10.3230 eV), високій електронегативності (5,8732 eV) та м'якості (0,1937eV) молекули. Це робить її ефективним кандидатом для використання в реакціях, де потрібна висока електрофільність. Аскорбінова кислота має найбільшу схильність до окисно-відновних реакцій завдяки найнижчому потенціалу іонізації. Винна та яблунева кислоти, навпаки, демонструють вищу стійкість та меншу реакційну здатність через високі значення жорсткості й електронегативності. НЕР-1 (Холін Хлорид-Левулінова кислота) має найнижчу хімічну м'якість (0,1865 eV) і порівняно високу електрофільність (1,4024), що вказує на його при формуванні НЕР прогнозно можна очікувати високу реакційну здатність між сполуками. Всі НЕР мають помірні значення електрофільності (близько 1,4), що є сприятливим для збереження їхньої стабільності. Найнижчі значення хімічної м'якості мають НЕР-4 (0,1764 eV) та НЕР-5 (0,1774 eV), що вказує на їх високу стійкість. Результати дослідження можуть бути корисними для розробки нових, більш ефективних розчинників для хімічної промисловості, зокрема технології отримання біополімерних матеріалів різного призначення.

**Ключові слова:** стабільність, молекулярна структура, молекули, нековалентні взаємодії, розчинники, суміші, аналіз поверхні.

**V. I. VOROBYOVA**

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
Head of the Department of Physical Chemistry  
National Technical University of Ukraine  
“Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute”  
ORCID: 0000-0001-7479-9140

**M. I. SKIBA**

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,  
Professor at the Department of Ecology and Technology of Inorganic Substances  
Ukrainian State University of Science and Technology  
ORCID: 0000-0003-4634-280X

A. S. MOSHENKO

Postgraduate Student at the Department of Physical Chemistry  
National Technical University of Ukraine  
“Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute”  
ORCID: 0000-0002-6933-4573

## SELECTION OF COMPONENTS FOR THE SYNTHESIS OF NEW LOW-TEMPERATURE EUTECTIC SOLVENTS BASED ON QUANTUM-CHEMICAL SIMULATION

*The paper presents a study of the selection process of components for the synthesis of new low-temperature eutectic solvents based on quantum chemical modeling. Emphasis is placed on the use of semi-empirical methods and density functional theory to assess reactivity and predict intermolecular interaction of potential components. The key quantum-chemical parameters, such as the energies of HOMO and LUMO, electronegativity, hardness and softness of molecules of a number of organic acids, have been determined, which allows to optimize the process of selecting components for the synthesis of the latest solvents. Among the studied organic acids, maleic acid shows the highest reactivity due to the low energy gap (-10.3230 eV), high electronegativity (5.8732 eV) and softness (0.1937 eV) of the molecule. This makes it an effective candidate for use in reactions where high electrophilicity is required. Ascorbic acid has the greatest tendency to redox reactions due to the lowest ionization potential. Tartaric and malic acids, on the contrary, show higher stability and lower reactivity due to high values of hardness and electronegativity. HER-1 (Choline Chloride-Levulinic acid) has the lowest chemical softness (0.1865 eV) and relatively high electrophilicity (1.4024), which indicates that high reactivity between compounds can be expected during the formation of HER. All HERs have moderate values of electrophilicity (about 1.4), which is favorable for maintaining their stability. The lowest values of chemical softness have HER-4 (0.1764 eV) and HER-5 (0.1774 eV), which indicates their high stability. The results of the research may be useful for the development of new, more effective solvents for the chemical industry, in particular, technologies for obtaining biopolymer materials for various purposes.*

**Key words:** Stability, Molecular Structure, Molecules, Noncovalent Interactions, Solvents, Mixtures, surface analysis.

### Постановка проблеми

Вивчення неводних розчинів має велике значення у формуванні багатьох розділів загальної теорії розчинів. В останні роки різко зросло і практичне значення неводних розчинів як середовища для різноманітних синтезів [1, с. 4] та електрохімічних процесів [с. 2], екстракції природних органічних сполук [3, с. 4], синтезу полімерних матеріалів, а також аналітичних визначень і хроматографічному розділенні органічних сполук. Більш оптимальні умови протікання синтезу в неводних розчинах порівняно з водними можуть бути обумовлені кращою розчинністю вихідних компонентів, підвищенням їх реакційної здатності, відсутністю реакції сольволізу і небажаних або, навпаки, наявністю бажаних таутомерних форм. Нарешті, розчинник сам може брати участь у реакції, що призводить до утворення необхідних сполук. У цьому причина підвищеного інтересу до створення нових неводних розчинів, а саме до низькотемпературних евтектичних розчинників [4, с. 1-10]. Відображенням цього інтересу є зростання кількості публікацій, присвячених неводним розчинам та їх практичному застосуванню в різних сферах промисловості, зокрема хімічній технології отримання полімерних матеріалів та покриттів [5, с. 1-3], у фармацевтичній галузі [6-7, с. 1-5] та інших виробничих процесах.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Низькотемпературні евтектичні розчинники (НЕР) є класом іонних рідин, які формуються шляхом змішування двох або більше компонентів, що здатні до утворення евтектичної суміші, і мають температуру плавлення нижчу за кожний з компонентів окремо [1, с. 1-5]. Вони мають численні переваги, такі як низька вартість, простота синтезу, біорозкладність, низька токсичність і екологічна безпечність [2, с. 1-12]. Існуючі в даний час методи дослідження неводних подвійних систем практично зводяться до вивчення залежності властивостей системи від молярного співвідношення компонентів, тобто входять до кола методів, які об'єднуються у фізико-хімічний аналіз. Сучасний фізико-хімічний аналіз рідких систем має у своєму розпорядженні великий арсенал методів, за допомогою яких фіксуються як факт взаємодії, так і склад утворених у системі НЕР сполук [7, с. 5-7]. При дослідженні неводних розчинів, а саме НЕР, всі завдання можна звести до постановки та вирішення чотирьох основних задач. Перше – це встановлення факту хімічного взаємодії між компонентами системи. Друге це визначення складу типів зв'язку, що утворюється в системі (водневий тип взаємодії, донорно-акцепторна взаємодія, іонна взаємодія). Далі вже визначення основних властивостей систем та можливість їх практичного використання. Дійсно всі дослідження – експериментальні і теоретичні переслідують основну мету а саме встановити факт взаємодії і визначення складу утворюється в подвійній системі НЕР з'єднання. При утворенні НЕР одна речовина діє як донор, а інша – як акцептор водневого зв'язку [4]. Ефективність формування НЕР залежить від просторової (молекулярної та електронної) структури донорної сполуки, а також від певних індексів реакційної здатності (ІРЗ). Експериментальний підбір компонентів для синтезу НЕР є тривалим і не завжди економічно виправданим. Однак, використовуючи теоретичні квантово-хімічні розрахунки, можна прогнозувати здатність



сполук до утворення зв'язків і виявляти потенційні центри міжмолекулярної взаємодії як у межах одного гомологічного ряду, так і між різними класами органічних сполук. Науковою спільнотою підсумовано, що основним при створенні нових НЕР є визначення реакційної здатності сполук, що можна спрогнозувати за допомогою квантово-хімічних розрахунків, які оцінюють електронні та енергетичні характеристики молекул. Тому перед синтезом нових НЕР доцільно оцінити та вибрати найбільш реакційно здатні сполуки, які можуть виконувати роль донорів у формуванні НЕР при використанні одного з типів акцептора. Крім того, останнім часом для створення нових НЕР все частіше використовуються напівемпіричні методи на основі теорії функціонала густини [7]. Зокрема, досліджуються енергетичні параметри  $E_{\text{ВЗМО}}$  донора і  $E_{\text{НВМО}}$  акцептора для прогнозування ефективності формування НЕР. Завдяки обчислювальним методам квантової хімії, у низці публікацій було представлено дані щодо електронної будови молекул, які виконують роль донорів водневого зв'язку у НЕР на основі холін хлориду. Однак систематизованих даних, щодо кореляційних залежностей для представників таких класів як карбонові кислоти, поліоли залишаються недослідженими.

#### Формулювання мети дослідження

Метою роботи було, спираючись на квантово-хімічні розрахунки, здійснити підбір компонентів для синтезу екологічно безпечних іонних рідин III типу з подальшим їх застосуванням у хімічних технологіях. Необхідно визначити квантово-хімічні характеристики компонентів та самої евтектичної системи, використовуючи параметри енергії ВЗМО ( $E_{\text{ВЗМО}}$ ) та НВМО ( $E_{\text{НВМО}}$ ), електронегативності ( $\chi$ ), індексу електрофільності ( $\omega$ ), хімічної жорсткості ( $\eta$ ) та м'якості ( $S$ ).

#### Викладення основного матеріалу дослідження

##### Методика експериментальних досліджень

Прогнозування реакційної здатності ряду органічних сполук було здійснено в програмному середовищі HyperChem на основі напівемпіричних методів оптимізації та моделювання молекул. Оптимізація молекул органічних сполук виконувалася з використанням напівемпіричного методу, зокрема розширеного методу РМ3. У програмі HyperChem застосовувались силові поля, такі як ММ+ (на основі ММ2). Індекси реакційної здатності визначалися на основі енергетичних та структурних параметрів молекул, отриманих в результаті квантово-хімічних розрахунків. Були встановлені локальні та реактивні параметри реакційної здатності органічних сполук відповідно за формулами, що наведені у табл. 1. Оцінку адсорбційної активності проводили, враховуючи індекси реакційної здатності, такі як електронна густина на граничних орбіталях ( $E_{\text{ВЗМО}}$  і  $E_{\text{НВМО}}$ ), енергетичний зазор між молекулярними орбіталями, абсолютна електронегативність, жорсткість та м'якість молекул, що базуються на теорії функціональної щільності.

Таблиця 1

#### Квантово-хімічні дескриптори та розрахункові параметри реакційної здатності органічних сполук для формування НЕР

$E_{\text{ВЗМО}}$	Вища зайнята молекулярна орбіталь
$E_{\text{НВМО}}$	Нижча вакантна молекулярна орбіталь
$I = - (E_{\text{ВЗМО}})$	Потенціал іонізації
$A = - (E_{\text{НВМО}})$	Спорідненість до електрону
$\Delta E = E_{\text{ВЗМО}} - E_{\text{НВМО}}$	Енергетичний зазор молекулярних орбіталей
$\chi = -\mu = \frac{1}{2}(I + A)$	Абсолютна електронегативність
$\eta = \frac{1}{2}(I - A)$	Жорсткість молекули
$S = \frac{1}{2}\eta$	М'якість
$\omega = \frac{(I + A)^2}{8(I - A)}$	Індекс електрофільності
$\Delta N = \frac{\mu_B - \mu_A}{2(\eta_A + \eta_B)} = \frac{\Phi - \chi_{\text{мол}}}{2\eta_{\text{мол}}}$	Перенос заряду

Тобто у роботі проведена порівняла оцінка як сполук донорів між собою, таї і параметри взаємодії при формуванні НЕР, коли холін хлорид виступає акцептором електронів, а ряд розглянутих сполук – донором. Параметри, які були визначені вище, є найбільш важливими параметрами, розглянутими в наукових дослідженнях [1-6] при добірї складових для синтезу іонних рідин.

## Отримані експериментальні результати

На рис. 1 представлено оптимізовані структури молекул сполук, а саме розміщення E ВЗМО та E НВМО. У таблиці 2 представлені складові для формування НЕР. У таблиці 3 представлено енергетичні параметри п'яти органічних кислот, де порівнюються енергії ВЗМО (вищої зайнятої молекулярної орбіталі), НВМО (нижчої вільної молекулярної орбіталі), а також енергетичні зазори між ними ( $\Delta E$ ). Левулінова кислота має енергетичний зазор  $\Delta E = -11.4170$  eV, що свідчить про її відносно високу стабільність і меншу реактивність у порівнянні з аскорбіновою і малеїновою кислотами. Аскорбінова кислота демонструє менший енергетичний зазор  $\Delta E = -10.77182$  eV, що вказує на її більшу реакційну здатність, особливо в порівнянні з винною і яблуною кислотами. Малеїнова кислота має  $\Delta E = -10.3230$  eV, що робить її найбільш реакційно здатною серед усіх досліджених сполук. Яблунова кислота має найвищий енергетичний зазор  $\Delta E = -11.95866$  eV, що робить її найбільш стабільною і найменш реактивною серед представлених кислот.

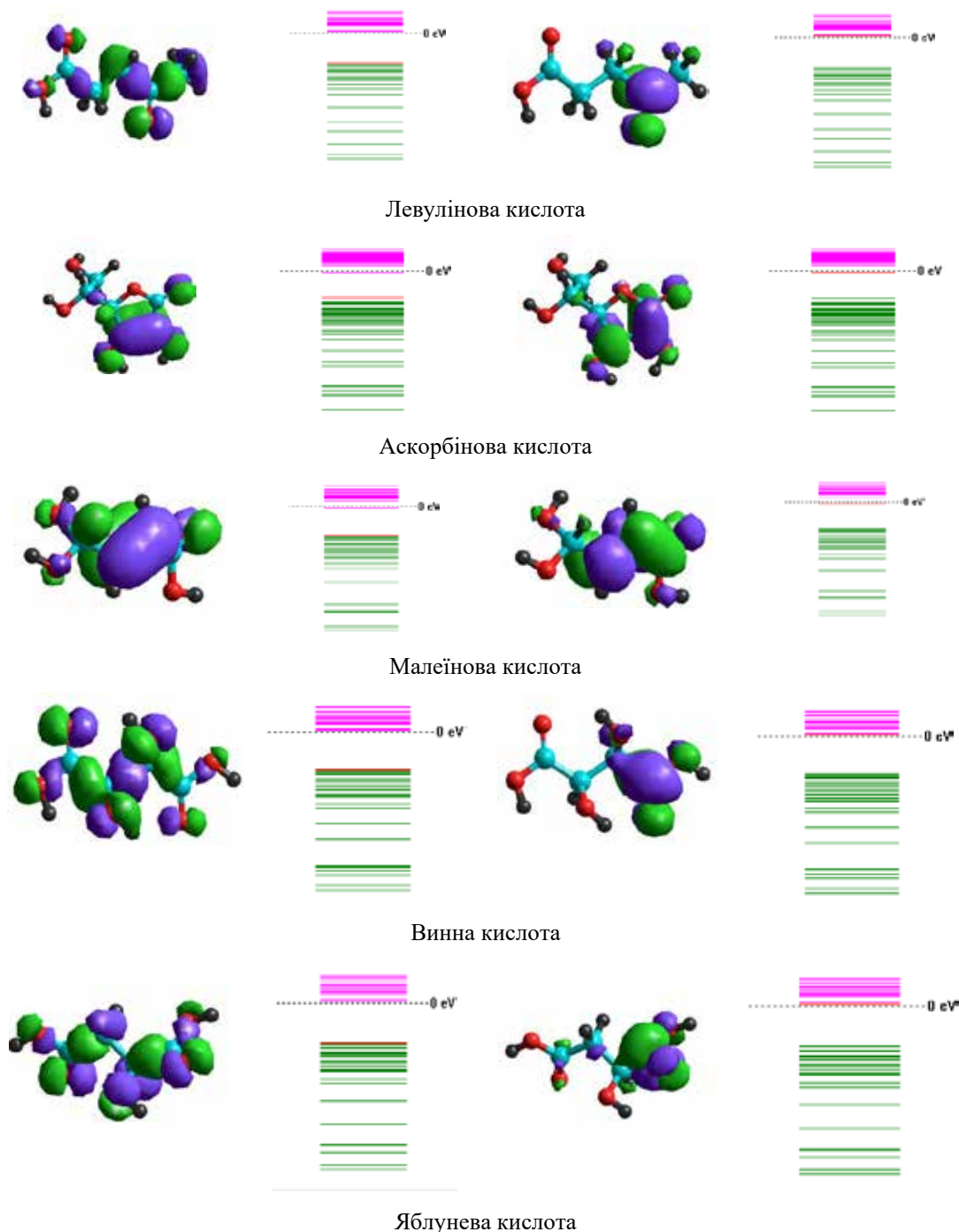
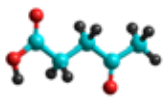
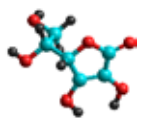
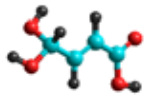
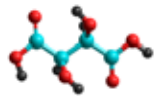
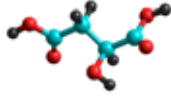


Рис. 1. Оптимізовані структури молекул сполук, розміщення E ВЗМО та E НВМО

Таким чином, малеїнова кислота демонструє найбільшу реакційну здатність через найменший енергетичний зазор, тоді як яблунова та винна кислоти є найбільш стабільними з найбільшими значеннями  $\Delta E$ .

Таблиця 2

## Системи НЕР на основі холін хлориду

Скорочення	Акцептор водневого зв'язку	Донор водневого зв'язку	Структурна формула
НЕР-1	Холін Хлорид	Левулінова кислота	
НЕР-2		Аскорбінова кислота	
НЕР-3		Малеїнова кислота	
НЕР-4		Винна кислота	
НЕР-5		Яблунова кислота	

Цей невеликий енергетичний зазор свідчить про легшу передачу електронів. Винна кислота з енергетичним зазором  $\Delta E = -11.89644$  eВ є найменш реакційно здатною, що свідчить про її вищу стабільність.

Таблиця 3

## Енергетичні параметри молекул

Сполуки	$E_{\text{взмо.}}(\text{eВ})$	$E_{\text{нвмо.}}(\text{eВ})$	$\Delta E = \text{HOMO-LUMO}$
Левулінова кислота	-10.97065	0.44636	-11.4170
Аскорбінова кислота	-9.9233	0.8485	-10.77182
Малеїнова кислота	-11.0348	-0.7116	-10.3230
Винна кислота	-11.5813	0.3151	-11.89644
Яблунова кислота	-11.5223	0.43636	-11.95866

У таблиці 4 представлено індекси реакційної здатності для п'яти органічних кислот: левулінової, аскорбінової, малеїнової, винної та яблунової. Найнижчий потенціал іонізації має аскорбінова кислота (9.9233), що свідчить про її легшу втрату електронів і більшу реакційну здатність у порівнянні з іншими кислотами. Найвищий потенціал іонізації має винна кислота (11.581), що вказує на її високу стійкість до втрати електронів.

Таблиця 4

## Індекси реакційної здатності молекул

Сполуки	Потенціал іонізації	Ядерної подібності до електронів	Електро-ненативність $\chi$	Жорсткість $\eta$	М'якість $\sigma$	Індекс електрофільності $\omega$	Індекс електрофільності $\epsilon$
Левулінова кислота	10.971	-0.4464	5.2623	5.7087	0.1751	1.3155	0.7601
Аскорбінова кислота	9.9233	-0.8485	4.5374	5.3859	0.1856	1.1343	0.8815
Малеїнова кислота	11.034	0.7116	5.8732	5.1615	0.1937	1.4683	0.6810
Винна кислота	11.581	-0.3151	5.6331	5.9482	0.1681	1.4082	0.71008
Яблунова кислота	11.5223	-0.4363	5.54296	5.97933	0.1672	1.38574	0.721635

Малеїнова кислота має найвищий позитивний показник (0.7116), що свідчить про її відносно вищу схильність до залучення електронів. Інші кислоти мають негативні значення, зокрема, аскорбінова (-0.8485) і яблунова

(-0.4363), що вказує на їхню схильність до втрати електронів. Найвища електронегативність спостерігається у малеїнової кислоти (5.8732), що означає її більшу здатність притягувати електрони. Найнижча електронегативність у аскорбінової кислоти (4.5374), що свідчить про її меншу здатність до залучення електронів. Левулінова кислота має найвищу жорсткість (5.7087), що вказує на її стійкість до зміни електронної структури. Найменш жорсткою є малеїнова кислота (5.1615), що свідчить про її більшу гнучкість у реакціях. Найм'якшою є малеїнова кислота (0.1937), що вказує на її високу реакційну здатність. Найжорсткіша – винна кислота (0.1681), що свідчить про її низьку реактивність. Найвищий індекс електрофільності має малеїнова кислота (1.4683), що робить її найефективнішим електрофілом.

Найменший індекс у аскорбінової кислоти (1.1343), що робить її найслабшим електрофілом серед досліджуваних сполук. Найвищий показник спостерігається у аскорбінової кислоти (0.8815), що може вказувати на її схильність до певних типів реакцій. Найнижче значення у малеїнової кислоти (0.6810), що вказує на її меншу схильність до електрофільних реакцій. Отже, малеїнова кислота демонструє найбільшу реакційну здатність завдяки високій електронегативності, м'якості та індексу електрофільності. Аскорбінова кислота має найнижчий потенціал іонізації, що робить її більш схильною до окисно-відновних реакцій, але водночас має меншу електронегативність і жорсткість. Винна і яблунова кислоти характеризуються вищою стійкістю та меншою реактивністю через їхні високі значення потенціалу іонізації та жорсткості. При дослідженні параметрів при формуванні вже самих НЕР (табл. 5), НЕР-1 має найнижчу хімічну м'якість (0.1865 eV) і порівняно високу електрофільність (1.4024), що вказує на його високу реакційну здатність між сполуками при формуванні НЕР. НЕР-4 (холін хлорид з винною кислотою) має найвищу електронегативність (5.9151 eV) і найменшу м'якість (0.1764 eV), що вказує що в НЕР сполуки менш реакційно здатні між собою. НЕР-5 (з яблуною кислотою) демонструє найвищі значення для  $\Delta E$  (11.7712 eV), що вказує на його стійкість і меншу здатність до реакцій у порівнянні з іншими НЕР. Всі НЕР мають помірні значення електрофільності (близько 1.4), що є сприятливим для збереження їхньої стабільності.

Таблиця 5

## Квантово-хімічні параметри НЕР

Скорочення	Акцептор водневого зв'язку	Донор водневого зв'язку	$\Delta E = \text{ВЗМО} - \text{НВМО}$	$\chi$ , eV	$\eta$ , eV	$\sigma$ , eV	$\omega$
НЕР-1	Холін Хлорид	Левулінова кислота	10.722	5.609	5.3610	0.1865	1.4024
НЕР-2		Аскорбінова кислота	9.6744	5.086	4.8372	0.2067	1.2715
НЕР-3		Малеїнова кислота	10.785	5.641	5.3929	0.1854	1.4104
НЕР-4		Винна кислота	11.332	5.9151	5.6662	0.1764	1.4787
НЕР-5		Яблунова кислота	11.7712	5.885	5.636	0.1774	1.4714

## Висновки

Встановлено, що за параметром  $E$  ВЗМО реакційна здатність донорів електронів для формування НЕР зменшується у напрямку: аскорбінова кислота (-9.9233 eV) < малеїнова кислота (-11.0348 eV) < левулінова кислота (-10.97065 eV) < яблунова кислота (-11.5223 eV) < винна кислота (-11.5813 eV). Серед досліджуваних органічних кислот малеїнова кислота виявляє найвищу реакційну здатність завдяки низькому енергетичному зазору, високій електронегативності та м'якості молекули. Це робить її ефективним кандидатом для використання в реакціях, де потрібна висока електрофільність. Аскорбінова кислота має найбільшу схильність до окисно-відновних реакцій завдяки найнижчому потенціалу іонізації. Винна та яблунова кислоти, навпаки, демонструють вищу стійкість та меншу реакційну здатність через високі значення жорсткості й електронегативності. На основі теоретичних квантово-хімічних розрахунків отримано параметри (електронегативність ( $\chi$ , eV), хімічна жорсткість ( $\eta$ , eV) та м'якість ( $\sigma$ , eV), електрофільність ( $\omega$ )) для прогнозування властивостей різних НЕР на основі холін хлориду та кислот, що важливо при виборі відповідного розчину для певних застосувань, таких як полімерні біопокриття або інші технологічні процеси, де потрібні специфічні властивості, такі як стабільність, реакційна здатність чи сумісність з іншими матеріалами. Найбільші значення  $\Delta E$  мають НЕР-5 (11.7712 eV) та НЕР-4 (11.332 eV), що свідчить про їх високу стійкість. Для стійкості НЕР ключовими параметрами є високі значення  $\Delta E$ , електронегативність, хімічна твердість і низька хімічна м'якість. Згідно з розрахунками, найбільш стійкими НЕР є НЕР-4 (винна кислота) та НЕР-5 (яблунова кислота), оскільки вони мають найвищі значення цих параметрів, що вказує на їхню високу хімічну та термічну стабільність.

**Фінансування.** Дослідження виконані в рамках науково-технічної роботи, що фінансуються за рахунок зовнішнього інструменту допомоги Європейського Союзу для виконання зобов'язань України у Рамковій програмі Європейського Союзу з наукових досліджень та інновацій "Горизонт 2020" «Створення нової технології виробництва біосировинних покриттів з використанням іонних рідин».

**Список використаної літератури**

1. Abbott, A. P., Capper, G., Davies, D. L., Rasheed, R. K., & Tambyrajah, V. (2003). Novel solvent properties of choline chloride/urea mixtures. *Chemical Communications*, no. 1, pp. 70-71.
2. Smith, E. L., Abbott, A. P., & Ryder, K. S. (2014). Deep eutectic solvents (DESs) and their applications. *Chemical Reviews*, vol. 114, no. 21, pp. 11060-11082.
3. Zhang, Q., Vigier, K. D. O., Royer, S., & Jérôme, F. (2012). Deep eutectic solvents: Syntheses, properties and applications. *Chemical Society Reviews*, vol. 41, no. 21, pp. 7108-7146.
4. Hayyan, A., Hashim, M. A., & AlNashef, I. M. (2016). Superoxide ion in deep eutectic solvents: enhanced reactivity and strong hydrogen bond network. *Chemical Reviews*, vol. 116, no. 3, pp. 1624-1649.
5. Hammond, O. S., Bowron, D. T., & Edler, K. J. (2016). Liquid structure of the choline chloride–urea deep eutectic solvent. *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 55, no. 33, pp. 9911-9914.
6. Francisco, M., van den Bruinhorst, A., & Kroon, M. C. (2013). Low-transition-temperature mixtures (LTTMs): a new generation of designer solvents. *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 52, no. 11, pp. 3074-3085.
7. Zhang, S., Sun, N., He, X., Lu, X., & Zhang, X. (2012). Physical properties of deep eutectic solvents. *Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 57, no. 11, pp. 2873-2884.

**С. П. ДЕНИСЮК**

доктор технічних наук,  
професор кафедри електропостачання  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: 0000-0002-6299-3680

**Г. С. БЄЛОХА**

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

**І. С. ЧЕРНЕЦУК**

аспірант кафедри електропостачання  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: 0000-0001-6895-7843

## ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОПРОЦЕСІВ В СИСТЕМАХ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З НЕІНТРУЗИВНИМ МОНІТОРИНГОМ

*Розвиток децентралізованих систем розширює можливості місцевих громад, переорієнтовуючи виробництво енергії з великих централізованих комунальних підприємств на локальні системи, керовані громадою. Традиційні системи керування енергією та методи оптимізації використання електроенергії споживачем контролюють електроприймачі за допомогою інтрузивних лічильників електроенергії. Для децентралізованих використовується техніка неінтрузивного моніторингу навантаження, яка є популярним підходом для моніторингу споживання енергії приладами або електромережами в будівлях за допомогою єдиного Smart-лічильника енергії. Необхідність розробки відповідних алгоритмів оптимізації, побудова систем моніторингу та систем керування для керування енергією є актуальною задачею. Для вирішення задач балансування та оптимізації навантаження в локальних електроенергетичних системах переважно використовуються системи Smart-моніторингу. Використання модифікованої потужності Фризе дозволяє аналізувати енергетичні процеси в децентралізованих системах. В роботі представлена оцінка енергетичних процесів за даними отриманими з використання неінтрузивного моніторингу, розроблено покроковий алгоритм моніторингу балансування у вузлі для оптимізації споживання енергії в будівлі та мережі. Балансування енергоспоживання у вузлі при зазначених умовах може бути представлений двома етапами: вирівнювання графіків за рахунок механізмів керування попитом та взаємобалансування у вузлі із врахуванням спільної роботи всієї множини підключених до вузла споживачів. Використання наведеного алгоритму моніторингу балансування за отриманими даними з неінтрузивного моніторингу надає можливість оцінки потенційних можливостей оптимізації енергопостачання; контролю споживання енергії будівлями; впровадження програм попиту, для отримання економічної вигоди споживачам.*

**Ключові слова:** smart-моніторинг, децентралізовані енергетичні системи, Smart-лічильники, неінтрузивний моніторинг.

**S. P. DENYSIUK**

Doctor of Technical Sciences,  
Professor at the Department of Power Supply  
National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
ORCID: 0000-0002-6299-3680

**H. S. BIELOKHA**

PhD, Associate Professor at the Department of Power Supply  
National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
ORCID: 0000-0003-4277-367X

I. S. CHERNESHCHUK

Postgraduate Student at the Department of Power Supply  
National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
ORCID: 0000-0001-6895-7843

## OPTIMIZATION OF ENERGY PROCESSES IN ENERGY SUPPLY SYSTEMS WITH NON-INSTRUTIVE MONITORING

*The development of decentralized systems empowers local communities by reorienting energy production from centralized to local, community-driven systems. Traditional energy management systems for optimizing the use of electricity by consumers control electricity receivers with the help of intrusive electricity meters. For decentralized, the technique of non-intrusive load monitoring is used, which is a popular approach for monitoring the energy consumption of appliances or electrical networks in buildings using a single Smart energy meter. The need to develop appropriate optimization algorithms, build monitoring systems and control systems for system management is an urgent task. Smart monitoring systems are mainly used to solve load balancing and optimization problems in local power systems. The use of modified Friese power allows the analysis of energy processes in decentralized systems. The paper presents the assessment of energy processes based on data obtained from the use of non-intrusive monitoring, and developed a step-by-step algorithm for monitoring balancing in the node to optimize energy consumption in the building and network. Balancing energy consumption in the node under the specified conditions can be represented by two stages: schedule alignment due to demand management mechanisms and mutual balancing in the node taking into account the joint work of the entire set of consumers connected to the node. The use of the given balancing monitoring algorithm based on the data obtained from non-intrusive monitoring provides opportunities to assess potential opportunities for energy supply optimization; control of energy consumption by buildings; implementation of demand programs to obtain economic benefits for consumers.*

**Key words:** smart monitoring, decentralized energy systems, Smart meters, non-intrusive monitoring.

### Постановка проблеми

Існуючі електроенергетичні системи переходять до децентралізованих систем з меншими викидами через широку інтеграцію відновлюваних джерел енергії. Ці системи розширюють можливості місцевих громад, переорієнтовуючи виробництво енергії з великих централізованих комунальних підприємств на локальні системи, керовані громадою.

Децентралізовані системи дають можливість окремим особам і громадам брати активну участь у виробництві енергії. Мешканці будівель можуть контролювати свій вибір енергії, розвиваючи почуття власності та залученості. Енергія стає інструментом самозабезпечення та розвитку громади [1,2].

Традиційні централізовані схеми керування потужністю не підходять для децентралізованих систем. Розробляються нові алгоритми керування, системи енергетичного менеджменту та системи моніторингу. Спільне використання даних, як невід’ємна частина сучасного розподілу електроенергії, змушує мережу живлення тісно поєднуватися з мережею даних, це означає, що керування енергетичною системою залежить від спільного використання даних про електроенергію.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для задоволення постійно зростаючих потреб в електроенергії розробляються програми реагування на попит. Традиційні системи керування енергією, які реагують на програми для оптимізації використання електроенергії споживачам контролюють електроприймачі за допомогою інтрузивних лічильників електроенергії. Децентралізовані (локальні) енергосистеми дозволяють розподіляти та споживати енергетичні ресурси більш ефективним та економічним шляхом. Smart-лічильники є невід’ємною частиною вимірювальної інфраструктури SmartGrid, яка дозволяє здійснювати моніторинг навантаження забезпечуючи звітність про енергоспоживання в реальному часі та зворотний зв’язок [3].

Останніми роками техніка неінтрузивного моніторингу навантаження (NILM) стала популярним і новим підходом для моніторингу подій (увімкнення/вимкнення) та споживання енергії приладами або електромережами в будівлях за допомогою єдиного Smart-лічильника енергії [4-6]. Неінтрузивний моніторинг навантаження є процесом оцінки споживання енергії приладами в приміщеннях споживача (наприклад, житлового або промислового).

Переваги використання неінтрузивного моніторингу включають: енергоефективність (знаючи, які прилади споживають найбільше енергії, можливе вживання заходів для заощадження на рахунках за електроенергію); реагування на попит (ідентифікація пристроїв з високим попитом і моделей їх використання для запровадження програми реагування на попит); аналіз поведінки мешканців; балансування та оптимізація навантаження.

Використання систем керування на попит змінило структуру передачі потужності в мережі низького рівня напруги з однонаправленого зверху вниз на більш розподілений спосіб. Зокрема, електроенергія може також переходити від домогосподарств до енергокомпаній, або між кількома домогосподарствами без взаємодії з вищим рівнем. Гнучкість передачі енергії ускладнює управління всією енергосистемою. Отже, необхідність розробки

відповідних алгоритмів оптимізації, побудова систем моніторингу для керування системою набуває все більшого інтересу. Виникає актуальна задача балансування енергоспоживання у вузлі системи як для централізованих, так і локальних електроенергетичних систем.

**Формулювання мети дослідження**

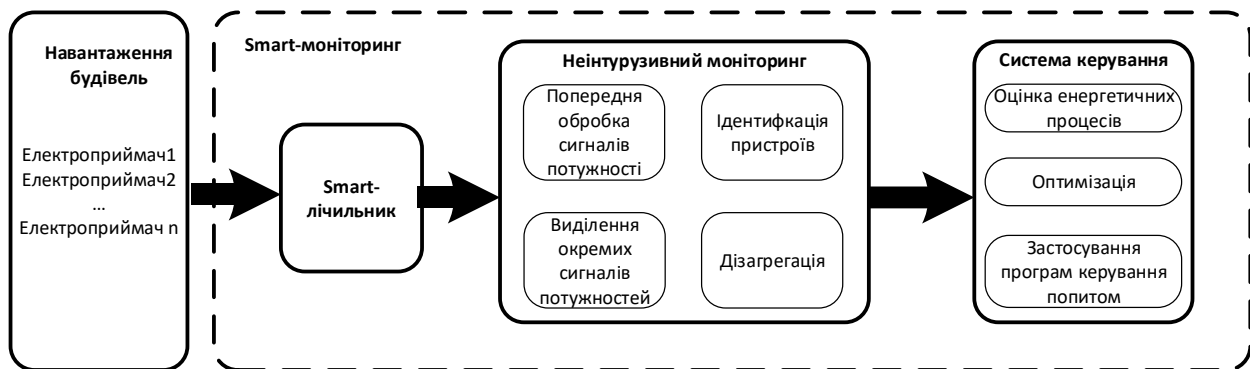
Метою роботи є оцінка енергетичних процесів за даними отриманими з використання неінтрузивного моніторингу і представлення алгоритму моніторингу для оптимізації споживання енергії в будівлі та мережі.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

При вирішенні задач балансування та оптимізації навантаження в децентралізованих системах використовуються Smart-моніторинг [7]. Smart-моніторинг розглядається як цільовий з визначенням цілей моніторинг – в залежності від сфери застосування, зокрема, запропоновано здійснювати оцінку поточної економічної ефективності елементів системи.

Smart-моніторинг здійснює моніторинг якості енергопостачання, перевіряє на відповідність стандартам всіх параметрів електромережі та організовує обмін електроенергією між елементами системи. На основі отриманих даних формується інформація для взаємодії об’єктів (наприклад, участі на ринках електроенергії). Система Smart-моніторингу з неінтрузивним моніторингом представлена на рис. 1.

Неінтрузивний моніторинг є процесом ідентифікації навантажень та їх споживаної потужності від джерела живлення за допомогою алгоритму розділення. Моніторинг споживання енергії будівлями дозволяє завчасно виявити та запобігти втратам енергії, а система керування енергією надає керуючі сигнали для застосування заходів для оптимізації споживання енергії.



**Рис. 1. Система Smart-моніторингу**

Отримання сигналу потужності є першим кроком у дезагрегації енергії та відповідає за отримання сукупних вимірювань навантаження. Одной з складових неінтрузивного моніторингу є попередня обробка сигналів потужностей та аналіз потужностей, дані якого передаються до системи керування енергією.

Розглянемо детально одну з оцінок енергетичних процесів та оптимізаційну процедура керування навантаженнями та виділено покроковий алгоритм аналізу енергетичних процесів.

Система складається із генератора з напругою  $u(t)$  та паралельно включених навантажень, із яких  $n'$  керованих та  $m'$  некерованих. Інтервал оптимізації процесів в системі позначимо як  $T_{\Pi}$ .

Під керованим навантаженням будемо розуміти  $i$ -е навантаження  $i_i^{(k)}(t; t_i^{(k)})$  та періодом енергетичних процесів  $T_i^{(k)}$ , для якої можлива зміна часового зсуву  $t_i^{(k)}$  умовного початку періоду  $T_i^{(k)}$  відносно початку інтервалу  $T_{\Pi}$ .

Під некерованим навантаженням будемо розуміти  $j$ -е навантаження  $i_j^{(h)}(t; t_j^{(h)})$  та періодом енергетичних процесів  $T_j^{(h)}$ , для якої величина  $t_j^{(h)}$  має аналогічний з  $t_i^{(k)}$  сенс та є незмінною для  $j$ -го некерованого навантаження. Тоді струм генератора

$$i(t) = \sum_{i=1}^{n'} i_i^{(k)}(t; t_i^{(k)}) + \sum_{j=1}^{m'} i_j^{(h)}(t; t_j^{(h)}) . \tag{1}$$

Вид кривої  $i(t)$  залежить від кожної із складових  $i_i^{(k)}(t; t_i^{(k)})$  та  $i_j^{(h)}(t; t_j^{(h)})$ .

Оптимізаційну задачу на інтервалі часу  $T_{\Pi}$  у загальному випадку можемо представити у вигляді:

$$i(t) = \sum_{i=1}^{n'} i_i^{(k)}(t; t_i^{(k)}) + \sum_{j=1}^{m'} i_j^{(h)}(t; t_j^{(h)}) \rightarrow \min , \tag{2}$$

де величини  $i_i^{(k)}(t; t_i^{(k)})$  та  $i_j^{(h)}(t; t_j^{(h)})$  змінюються в заданих (допустимих) межах.

Для уточнення оптимізаційної задачі  $i_i^{(k)}(t; t_i^{(k)})$  та  $i_j^{(h)}(t; t_j^{(h)})$  множини величин  $\{i_i^{(k)}(t; t_i^{(k)}), i = 1, \dots, n'\}$   $\{i_j^{(h)}(t; t_j^{(h)}), j = 1, \dots, m'\}$  розбиваються на кластери в залежності від виду (типу) електроприймача (ця інформація отримується за результатами неінтрузивного моніторингу):



$$i(t) = \sum_{l=1}^{n_l} \sum_{p=1}^{n_{p,l}} i_{lp}^{(k)}(t; t_{lp}^{(k)}) + \sum_{r=1}^{m_r} \sum_{s=1}^{m_{s,r}} i_{rs}^{(H)}(t; t_{rs}^{(H)}), \tag{3}$$

де виконуються умови

$$n' = \sum_{l=1}^{n_l} n_{p,l}, \quad m' = \sum_{r=1}^{m_r} m_{s,r}. \tag{4}$$

Оцінемо енергетичні процеси в системі з застосування модифікованої потужності Фрізе, як квадратичної нев'язки, на лінійні та складені функції струму споживання [8].

Для режиму, що характеризується діючими значеннями напруги  $U_i$  та струму  $I_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , де  $t_i$  – тривалість  $i$ -го інтервалу, та  $P = U_0 \cdot I_0$ , де  $U_0, I_0$  – усереднені значення напруги та струму, інтервалу часу  $T$ , вираз для модифікованої потужності Фрізе  $Q_\Phi$ :

$$Q_\Phi = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n U_i^2 \frac{\Delta t_i}{T}\right) \left(\sum_{j=1}^n I_j^2 \frac{\Delta t_j}{T}\right) - U_0^2 I_0^2}, \tag{5}$$

який при умовах  $\delta_i = \Delta t_i / T$ ;  $\sum_{i=1}^n \delta_i = 1$  набуває вигляду:

$$Q_\Phi = \sqrt{\sum_{i=1}^n U_i^2 \delta_i \cdot \sum_{i=1}^n I_i^2 \delta_i - \left(\sum_{i=1}^n U_i I_i \delta_i\right)^2}. \tag{6}$$

Розглянемо розбіжності потужності Фрізе для наявних графіків змінення струму в системі (рис. 2).

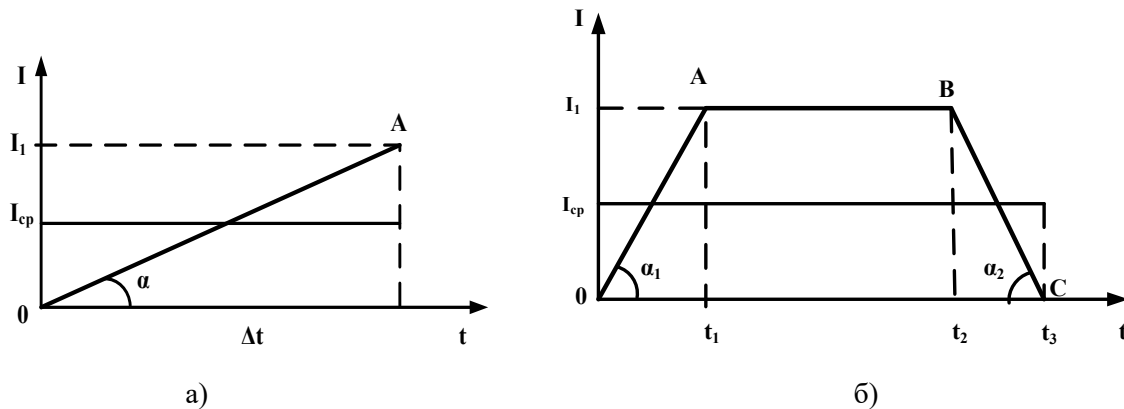


Рис. 2. Графіки струму

Розрахунок  $Q_\Phi$  для графіка представленого на рис. 2а:

$$I_0 = I_{cp} = \frac{I_1}{2}, \quad I_D^2 = \frac{I_1^2}{3}, \tag{7}$$

$$Q_\Phi^2 = U_D^2 I_D^2 - (U_0 I_0)^2. \tag{8}$$

При умові  $U_D \approx U_0$  можемо записати:

$$Q_\Phi^2 = U_D^2 I_1^2 \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{4}\right) \approx 0,083 U_D^2 I_1^2, \tag{9}$$

$$Q_\Phi \approx 0,287 U_D I_1. \tag{10}$$

Розрахунок  $Q_\Phi$  для графіка рис. 2б, на інтервалі  $[0, t_3] = T$ :

$$I_0 = I_{cp} = \frac{I_1 t_1}{2T} + \frac{I_1(t_2 - t_1)}{T} + \frac{I_1(t_3 - t_2)}{2T} = I_1 \frac{t_1/2 + (t_2 - t_1) + (t_3 - t_2)/2}{T}, \tag{11}$$

$$I_D^2 = I_1^2 \left(\frac{t_1}{3T} + \frac{t_2 - t_1}{T} + \frac{t_3 - t_1}{3T}\right) = I_1^2 \left(\frac{t_1/3 + (t_2 - t_1) + (t_3 - t_1)/3}{T}\right). \tag{12}$$

При умові  $U_D \approx U_0$  можемо записати вираз (8):

$$Q_{\Phi}^2 = \frac{U_D^2 I_1^2}{T} \left[ (t_1/3 + (t_2 - t_1) + (t_3 - t_2)/3) - (t_1/2 + (t_2 - t_1) + (t_3 - t_2)/2)^2 \right]. \quad (13)$$

При  $(t_2 = t_1)$  вираз для  $Q_{\Phi}^2$  матиме вигляд:

$$Q_{\Phi}^2 = \frac{U_D^2 I_1^2}{T} \left[ 1/3 - (t_1/2 + (t_3 - t_1)/2)^2 \right]. \quad (14)$$

Діюче значення  $I_D$  складеної функції  $i(t) = i_1(t) + i_2(t)$ :

$$I_D^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T (i_1(t) + i_2(t))^2 dt = \frac{1}{T} \left[ \int_0^T i_1(t)^2 dt + \int_0^T i_2(t)^2 dt + 2 \int_0^T i_1(t) i_2(t) dt \right] \quad (15)$$

Розглянемо використання модифікованої потужності Фризе згідно співвідношень (5) та (6) для системи, що складається з кількох регульованих споживачів (багатофункціональних будівель), підключених до однієї підстанції (живляться від одного джерела з паралельним підключенням).

У цьому випадку при  $U_D = U_0$  можемо записати:  $Q_{\Phi}^2 = U_D^2 \cdot (I_D^2 - I_0^2)$ .

$K_n$  – критерій нерівномірності електроспоживання:

$$K_n = \frac{I_D^2 - I_0^2}{I_0^2} = \frac{I_D^2}{I_0^2} - 1. \quad (16)$$

Нехай задача балансування енергоспоживання у вузлі розглядається для  $n$  споживачів, що можуть регулювати своє енергоспоживання (згідно співвідношень (1) – (4)). На наш погляд, балансування енергоспоживання у вузлі при зазначених умовах може бути представлений двома етапами:

1-й етап: вирівнювання графіків енергоспоживання  $j$ -м ( $j=1, \dots, n$ ), наприклад, за рахунок механізмів керування попитом з використанням еталонних графіків енергоспоживання;

2-й етап: взаємобалансування у вузлі із врахуванням спільної роботи всієї множини підключених до вузла споживачів.

Критерії балансування:

1-й етап:

$$K_{Hj} = \frac{I_{Dj}^2 - I_{0j}^2}{I_{0j}^2} = \frac{I_{Dj}^2}{I_{0j}^2} - 1; j = 1, \dots, n. \quad (17)$$

2-й етап:

$$K_{H,\Sigma} = \sum_{j=1}^n \left( \frac{I_{Dj}^2 - I_{0j}^2}{I_{0j}^2} \right) = \sum_{j=1}^n \left( \frac{I_{Dj}^2}{I_{0j}^2} - 1 \right); j = 1, \dots, n. \quad (18)$$

Особливості оцінки балансування енергоспоживання (оцінки впливів) у вузлі системи розглянемо для підключення до вузла живлення двох споживачів, графіки навантажень цих споживачів апроксимовані кусочно-постійними функціями при виділенні двох інтервалів  $\Delta t_1$  та  $\Delta t_2$ , де  $\Delta t_1 + \Delta t_2 = T$ ;  $\delta_1 = \Delta t_1 / T$ ;  $\delta_2 = \Delta t_2 / T$ . Струми, що споживаються 1-м та 2-м споживачем (перший індекс) на кожному із інтервалів (другий індекс), позначимо наступним чином:  $I_{1,1}$  та  $I_{1,2}$ ;  $I_{2,1}$  та  $I_{2,2}$ ;  $I_1 = I_{1,1} + I_{1,2}$ ;  $I_2 = I_{2,1} + I_{2,2}$ .

Згідно співвідношень (5) та (6) для діючих (індекс «D») та середніх (індекс «0») значень струму на вході споживачів можемо записати:

$$I_{1,D}^2 = I_{1,1}^2 \delta_1 + I_{1,2}^2 \delta_2 \quad I_{1,0} = I_{1,1} + I_{1,2} \quad I_{2,D}^2 = I_{2,1}^2 \delta_1 + I_{2,2}^2 \delta_2 \quad I_{2,0} = I_{2,1} + I_{2,2}. \quad (19)$$

Для діючого (індекс «D») та середнього (індекс «0») значень струму на виході вузла живлення (індекс «Σ»):

$$I_{\Sigma,D}^2 = I_{1,D}^2 + I_{2,D}^2 + 2I_{1,1}I_{2,1}\delta_1 + 2I_{1,2}I_{2,2}\delta_2 \quad I_{\Sigma,0} = I_{1,0} + I_{2,0}. \quad (20)$$

Вирази для квадратів модифікованої реактивної потужності Фризе на вході кожного із споживачів ( $Q_{\Phi,1}$  та  $Q_{\Phi,2}$ ) та на виході вузла живлення  $Q_{\Phi,\Sigma}$ :

$$Q_{\Phi,1}^2 = U^2 (I_{1,D}^2 - I_{1,0}^2), \quad Q_{\Phi,2}^2 = U^2 (I_{2,D}^2 - I_{2,0}^2), \quad Q_{\Phi,\Sigma}^2 = U^2 (I_{\Sigma,D}^2 - I_{\Sigma,0}^2). \quad (21)$$

Згідно (6), (19) та (20) вирази (21) набувають вигляду:

$$Q_{\Phi,1}^2 = U^2 \delta_1 \delta_2 (I_{1,1} - I_{1,2})^2 \quad Q_{\Phi,2}^2 = U^2 \delta_1 \delta_2 (I_{2,1} - I_{2,2})^2 \quad Q_{\Phi,\Sigma}^2 = U^2 \delta_1 \delta_2 (I_1 - I_2)^2. \quad (22)$$

Нерівномірність енергоспоживання у даному випадку з використанням виразів (19) – (21) оцінюється співвідношенням:

$$\Delta Q_{\phi,1}^2 = Q_{\phi,\Sigma}^2 - (Q_{\phi,1}^2 + Q_{\phi,2}^2) = U^2 \delta_1 \delta_2 [(I_1 - I_2)^2 - ((I_{1,1} - I_{1,2})^2 + (I_{2,1} - I_{2,2})^2)]. \quad (23)$$

Вираз (23) з врахуванням складових струму на кожному із інтервалів апроксимації набуде вигляду:

$$\Delta Q_{\phi,1}^2 = 2U^2 \delta_1 \delta_2 [I_{1,1} I_{2,1} + I_{1,2} I_{2,2} + I_{1,1} I_{1,2} + I_{2,1} I_{2,2} + I_{1,1} I_{1,2} I_{2,1} I_{2,2}]. \quad (24)$$

Співвідношення (22), (23) визначають складові, які необхідно враховувати при балансуванні енергоспоживання у вузлі. Сумарна (загальносистемна) оптимальність системи може передбачати «неоптимальність» роботи окремих підсистем.

Наведемо алгоритм моніторингу балансування у вузлі з використання зазначених етапів та можливості керування попитом.

Крок 1. Побудова графіків енергоспоживання кожним  $j$ -м ( $j = 1, \dots, n$ ) споживачем. Оцінка потенційних можливостей оптимізації енергопостачання (наприклад, з використання механізмів керування попитом).

Крок 2. Вирівнювання графіків енергоспоживання  $j$ -м ( $j = 1, \dots, n$ ), наприклад, за рахунок механізмів керування попитом (етап 1). Визначення  $K_{H,j}^1$  та  $K_{H,\Sigma}^1$  згідно співвідношень (17) та (18).

Крок 3. Перевірка умови  $K_{H,\Sigma}^1 \leq K_{H,\Sigma}^{гр}$ . Якщо умова виконується, то перехід на Крок 6; у протилежному випадку перехід до Кроку 4.

Крок 4. Взаємобалансування у вузлі із врахуванням спільної роботи всієї множини підключених до вузла споживачів. Визначення  $K_{H,j}^2$  та  $K_{H,\Sigma}^2$  згідно співвідношень (17) та (18).

Крок 5. Перевірка умови  $K_{H,\Sigma}^2 \leq K_{H,\Sigma}^{гр}$ . Якщо умова виконується, то перехід на Крок 6; у протилежному випадку перехід до Кроку 2.

Крок 6. Завершення оптимізаційного процесу балансування енергоспоживання у вузлі системи.

Можлива ситуація, коли споживачі (будівля) можуть також реалізувати взаємобалансування окремих груп електроприймачів, що підключені до одного вводу. Для будівлі такими групами споживачів можуть розглядатися: секції будівлі; блоки поверхів (різне призначення); поверх / секція; сукупність квартир на поверсі.

#### Висновки

1. Для оцінки використання енергії в житлових та комерційних будівлях обрано неінтрузивний моніторинг, який надає дані щодо споживання енергії дозволяючи системам Smart-моніторингу точно визначити області для підвищення енергозбереження та оцінити ефективність впроваджених заходів з енергоефективності.

2. Оцінено енергетичні процеси в системі з генератором та навантаженнями (будівлями) з застосування модифікованої потужності Фризе.

3. Використання розробленого алгоритму моніторингу балансування за отриманими даними з неінтрузивного моніторингу надає можливості оцінити потенційні можливості оптимізації енергопостачання, контроль споживання енергії будівлями та впровадження програм попиту, для отримання економічної вигоди споживачем.

#### Список використаної літератури

1. Roger Achkar. Decentralized Energy Systems: Empowering Local Communities <https://www.linkedin.com/pulse/decentralized-energy-systems-empowering-local-dr-roger-achkar-lemuyf> [дата звернення 20.09.2024]
2. Seyed Amir Mansouri, Amir Ahmarinejad, Emad Nematbakhsh, Mohammad Sadegh Javadi, Ahmad Rezaee Jordehi, João P.S. Catalão, Energy management in microgrids including smart homes: A multi-objective approach, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 69, 2021, 102852, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102852>
3. Bakare, M.S., Abdulkarim, A., Zeeshan, M. et al. A comprehensive overview on demand side energy management towards smart grids: challenges, solutions, and future direction. *Energy Inform* 6, 4. 2023. <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00262-7>
4. R.V.A. Monteiro; J.C.R. de Santana; R.F.S. Teixeira; A.S. Bretas; R. Aguiar; C.E.P. Poma;. Non-intrusive load monitoring using artificial intelligence classifiers: Performance analysis of machine learning techniques. *Electric Power Systems Research*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107347>
5. Desai S, Alhadad R, Mahmood A, Chilamkurti N, Rho S. Multi-State Energy Classifier to Evaluate the Performance of the NILM Algorithm. *Sensors (Basel)*. 2019 Nov 28;19(23):5236. <https://doi.org/10.3390/s19235236>
6. Чернещук І. С. Неінтрузивний моніторинг навантаження – перспективний напрямок моніторингу електроспоживання будівель. *Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал*. 2024. № 2. С. 106-118. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2024.303119>
7. Кириленко, О., Стогній, Б., Денисюк, С. і Сопель, М. Smart-моніторинг електроенергетичних систем. *Технічна електродинаміка*. 2024. № 5. С. 048. <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.048.4>
8. Bielokha, H.S., Denysiuk, S.P. & Khilenko, V.V. Analyzing Metabolic Processes to Optimize the Technical and Economic Indicators of Microgrid Systems. *Cybern Syst Anal*. 58, 818–824. 2022. <https://doi.org/10.1007/s10559-022-00514-6>

## References

1. Roger Achkar. Decentralized Energy Systems: Empowering Local Communities <https://www.linkedin.com/pulse/decentralized-energy-systems-empowering-local-dr-roger-achkar-lemyf> [date of application 20.09.2024]
2. Seyed Amir Mansouri, Amir Ahmarinejad, Emad Nematbakhsh, Mohammad Sadegh Javadi, Ahmad Rezaee Jordehi & João P.S. Catalão, (2021) Energy management in microgrids including smart homes: A multi-objective approach, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 69. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102852>
3. Bakare, M.S., Abdulkarim, A. & Zeeshan, M. (2023). A comprehensive overview on demand side energy management towards smart grids: challenges, solutions, and future direction. *Energy Inform* 6, 4 <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00262-7>
4. R.V.A. Monteiro; J.C.R. de Santana; R.F.S. Teixeira; A.S. Bretas; R. Aguiar & C.E.P. Poma (2021) Non-intrusive load monitoring using artificial intelligence classifiers: Performance analysis of machine learning techniques. *Electric Power Systems Research*, Vol. 198. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107347>
5. Desai, S., Alhadad, R., Mahmood, A.N., Chilamkurti, N.K., & Rho, S. (2019). Multi-State Energy Classifier to Evaluate the Performance of the NILM Algorithm. *Sensors (Basel)*, 19. <https://doi.org/10.3390/s19235236>
6. Cherneshchuk I.S. (2024) (Neintruzyvnyi monitorynh navantazhennia – perspektyvnyi napriamok monitorynhu elektrospozhyvannia budivel [Non-intrusive load monitoring – a promising direction of building electricity consumption monitoring] *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya: naukovyy zhurnal* [Energy: economy, technology, ecology: scientific journal]. Vol 2. P. 106-118. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2024.303119> (in Ukrainian)
7. Kyrylenko, O., Stogniy, B., Denysiuk, S. & Sopol, M. (2024) Smart-monitorynh elektroenerhetychnykh system. [Smart-monitoring of electric power systems]. *Tekhnichna Elektrodynamika*. [Technical electrodynamics]. Vol 5. P. 048. <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.048>. (in Ukrainian)
8. Bielokha, H.S., Denysiuk, S.P. & Khilenko, V.V. (2022) Analyzing Metabolic Processes to Optimize the Technical and Economic Indicators of Microgrid Systems. *Cybern Syst Anal*. Vol 58, 818–824. <https://doi.org/10.1007/s10559-022-00514-6>

В. А. ЗОЗУЛЯ

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри цифрової економіки та системного аналізу  
Державний торговельно-економічний університет  
ORCID: 0000-0003-3793-4686

С. І. ОСАДЧИЙ

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри конструкції повітряних суден, авіадвигунів  
та підтримання льотної придатності  
Льотна академія Національного авіаційного університету  
ORCID: 0000-0002-1811-3594

## ТЕХНОЛОГІЯ СТРУКТУРНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ДВОКОНТУРНОЇ БАГАТОВИМІРНОЇ СЛІДКУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДО СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ

У статті розглядаються платформи Стюарта як об'єкт керування. Визначено, що однією з ключових задач є підвищення точності виконання програмного руху робочої поверхні платформи, що вимагає вирішення кількох складних питань дослідження динамічних об'єктів. Для спрощення процесів аналізу та синтезу таких складних систем, як система керування рухом робочої поверхні платформи Стюарта, запропоновано технологію, яка перетворює структурну схему двоконтурної багатовимірної слідувальної системи на схему багатовимірної системи стабілізації. Розробка цієї технології є основною метою дослідження. Технологія базується на загальному принципі перетворення слідувальних систем до еквівалентних систем стабілізації з урахуванням правил перетворення структурних схем та лінійних систем. Вона призначена для перетворення багатовимірної двоконтурної слідувальної системи з корекцією за збуреннями або без неї. Визначені похибки та функціонал критерію якості двоконтурної слідувальної системи з урахуванням корекції за збуреннями. Окремо підкреслено значення поліноміальних вагових матриць, що обмежують дисперсію сигналу керування та помилок. Ці матриці встановлюються на основі відомих характеристик динаміки об'єкта стабілізації та фізичного змісту компонентів векторів вихідних координат і сигналів керування, що дозволяє визначити їх нормативні значення та встановити взаємозв'язок між ними. Таким чином, результатом роботи є розробка методики та технології структурного перетворення схеми багатовимірної слідувальної системи керування рухом робочої поверхні платформи Стюарта на схему системи стабілізації, що дозволяє проводити подальший синтез і оцінку якості системи. Запропонована методика й технологія є основою для створення інформаційної технології аналітичного проектування оптимальної багатовимірної слідувальної системи керування рухом робочої поверхні платформи Стюарта в умовах випадкових впливів, яка включає виконання низки взаємопов'язаних операцій.

**Ключові слова:** платформа Стюарта, двоконтурна слідувальна система, система стабілізації, функціонал критерію якості.

V. A. ZOZULIA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Digital Economy and System Analysis  
State University of Trade and Economics  
ORCID: 0000-0003-3793-4686

S. I. OSADCHIY

Dr. Sc., Professor,  
Professor at the Department of Aircraft Construction, Aircraft Engines,  
and Airworthiness Maintenance  
Flight Academy of the National Aviation University  
ORCID: 0000-0002-1811-3594

## THE STRUCTURAL TRANSFORMATION TECHNOLOGY OF A TWO-LOOP MULTIDIMENSIONAL TRACKING CONTROL SYSTEM INTO STABILIZATION SYSTEMS

The article examines Stewart platforms as a control object. It has been determined that one of the key tasks is to enhance the accuracy of executing programmed movements of the platform's working surface, which requires addressing several complex issues related to the study of dynamic objects. To simplify the processes of analysis and synthesis for

such complex systems as the Stewart platform's working surface control system movement, a technology is proposed that transforms the structural scheme of a two-loop multidimensional tracking system into a scheme of a multidimensional stabilization system. The development of this technology is the main objective of the research. The technology is based on the general principle of transforming tracking systems into equivalent stabilization systems, taking into account the rules for transforming structural schemes and linear systems. It is designed to convert a multidimensional two-loop tracking system with or without disturbance correction. The errors and the quality criterion functionality of the two-loop tracking system with consideration for disturbance correction have been defined. The significance of polynomial weighting matrices that limit the dispersion of control signals and errors is emphasized separately. These matrices are established based on known characteristics of the stabilization object's dynamics and the physical meanings of the components of the output coordinate vectors and control signals, which allows for the determination of their normative values and the establishment of relationships between them. Thus, the outcome of the work is the development of a methodology and technology for the structural transformation of the scheme of the Stewart platform's working surface movement multidimensional tracking control system into a stabilization system scheme, enabling further synthesis and evaluation of the system's quality. The proposed methodology and technology serve as the foundation for creating an information technology for the analytical design of the Stewart platform's working surface movement optimal multidimensional tracking control system under random influences, which includes the execution of a series of interrelated operations.

**Key words:** Stewart platform, two-loop tracking system, stabilization system, quality criterion functionality.

### Постановка проблеми

Особливу увагу привертають конструкції просторових механізмів із паралельною структурою, які вперше з'явилися у 50–60-х роках ХХ століття в роботах Стюарта і Гауфа [1, 2]. Згодом конструкція, що складається з шести однакових кінематичних ланцюгів (штанг), отримала назву «платформа Стюарта». Завдяки програмному регулюванню довжини цих ланцюгів, можна керувати положенням вихідної ланки, переміщуючи її у вертикальному та горизонтальному напрямках і повертаючи в трьох площинах. Така платформа має шість ступенів вільності: три поступальні та три обертальні.

У дослідженні [3] було проведено аналіз структурних схем систем керування рухом робочої поверхні (РП) платформи Стюарта для різних технологічних завдань: позиціонування, стабілізація, тренажери рухів мобільних об'єктів тощо [4]. На основі теорії автоматичного керування встановлено, що незалежно від сфери застосування, всі системи керування рухом РП платформи Стюарта можна класифікувати як багатовимірні двоконтурні слідкувальні системи з корекцією за збуреннями або без неї [5].

Для складного багатовимірного об'єкта керування, такого як платформа Стюарта, актуальною є задача максимізації точності виконання заданого руху. Як зазначено в монографії [6], вирішення цієї задачі вимагає розв'язання низки проблем, пов'язаних зі створенням оптимальної системи керування.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз результатів досліджень, наведених у джерелах [6, 7], дозволив сформулювати концепцію аналітичного проектування оптимальної системи керування рухом РП платформи Стюарта. Ця концепція полягає в тому, щоб привести структурну схему багатовимірної слідкувальної системи до схеми багатовимірної системи стабілізації, з подальшим застосуванням методу синтезу, описаного у [8].

У роботі [6] запропоновано загальний алгоритм структурного перетворення слідкувальних систем до еквівалентних систем стабілізації, враховуючи правила перетворення структурних схем та лінійних систем [9]. Це перетворення формалізує та суттєво спрощує вирішення завдань аналізу і синтезу складних динамічних систем, таких як системи керування рухом РП платформи Стюарта.

### Формулювання мети досліджень

**Метою статті** є розробка технології структурного перетворення двоконтурної схеми багатовимірної слідкувальної системи керування рухом РП платформи Стюарта до схеми системи стабілізації для подальшого дослідження синтезу та якості даної системи.

### Викладення основного матеріалу дослідження

У роботі [5] запропоновано структурну схему двоконтурної багатовимірної слідкувальної системи керування рухом робочої платформи (РП) платформи Стюарта, як це показано на рисунку 1, із відповідними позначеннями та термінами.

Маємо  $x_1 - n$  – мірний вектор вихідних координат об'єкта керування, платформи Стюарта;  $P_0$  – поліноміальна матриця розмірності  $n \times n$ , яка характеризує динаміку об'єкта керування;  $u - m$  – мірний вектор сигналів керування;  $M_0$  – поліноміальна матриця розмірності  $n \times m$ , яка визначає чутливість об'єкта до зміни сигналів керування;  $\psi_{об} - n$  – мірний вектор стаціонарних випадкових збурень в об'єкті керування з нульовим математичним очікуванням; динаміка частин регулятора, розташованих у ланцюгу завдання програмного сигналу, в зворотному зв'язку до об'єкта та в ланцюзі об'єкта керування, описується матрицями передатних функцій  $W_2, W_1$  та  $W_3$  які мають розмірності  $m \times n$ . Будемо вважати також, що вектор вихідних координат  $x_1$  вимірюється повністю за допомогою системи неідеальних датчиків, динаміка яких визначається матрицею передавальних



Як видно з рисунка 1, на входах вимірювачів  $K_1$  та  $K_2$  діють вектор вихідних координат об'єкта керування  $x_1$  та похибка слідкуючої системі  $\varepsilon$ , відповідно, а на виході вимірювачів  $K_1$  та  $K_2$  отримують вектори  $x_2$  та  $\varepsilon_1$ . Тоді можна записати наступне рівняння:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ \varepsilon_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \varepsilon_x \end{bmatrix}. \tag{6}$$

Введемо позначення

$$x_{\varepsilon_1} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \varepsilon_1 \end{bmatrix}, K_0 = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix}, \tag{7}$$

Як видно з рисунка 1, на вході регулятора  $W_0$  діють вектори  $x_3$  та  $\varepsilon_2$ , по аналогії з першим варіантом системи слідкування можна записати наступне рівняння:

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \varepsilon_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_r \end{bmatrix}, \tag{8}$$

введемо позначення:

$$x_{\varepsilon_2} = \begin{bmatrix} x_3 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix}, \phi_0 = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_r \end{bmatrix} \tag{9}$$

З врахуванням рівняння (6) та (8), позначень (7), (9) отримуємо:

$$x_{\varepsilon_2} = K_0 x_{\varepsilon_1} + \phi_0.$$

Рівняння сигналу керування  $u$  можна визначити, як:

$$u = W_3 (-W_1 x_3 + W_2 \varepsilon_2),$$

а в матричній формі

$$u = W_3 \begin{bmatrix} -W_1 & W_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix},$$

або

$$u = W_0 (K_0 x_{\varepsilon_1} + \phi_0). \tag{10}$$

де  $W_0 = W_3 \begin{bmatrix} -W_1 & W_2 \end{bmatrix}$  – передаточна функція регулятора двоконтурної слідкуючої системи.

Таким чином, двоконтурна слідкувальна система еквівалентна за структурою рівняннями об'єкта (5) та регулятора (10) системі стабілізації, яка зображена на рисунку 2.

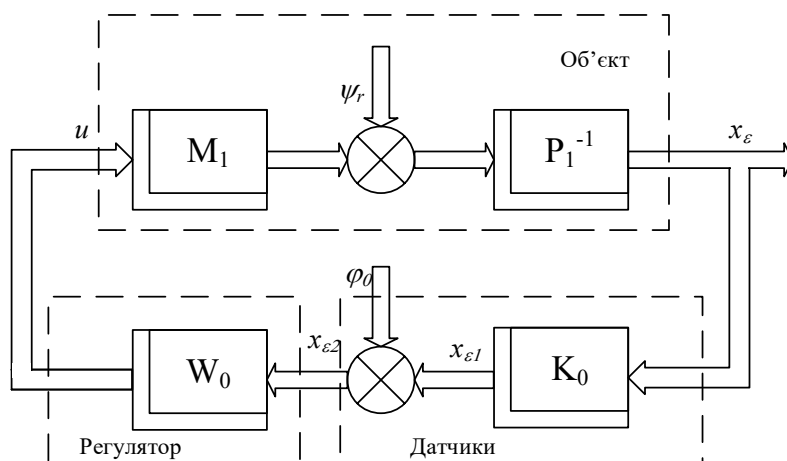


Рис. 2. Структурна схема багатовимірної системи стабілізації

Тоді на підставі [6] функціонал критерію якості системи стабілізації для двоконтурної слідкуючої системи набуває вигляду:



$$e = \langle x_{\varepsilon}' R x_{\varepsilon} \rangle + \langle u' C u \rangle, \quad (11)$$

де “<>” – знак математичного очікування; “/” – знак транспонування [10];  $R$  – додатно визначена поліноміальна вагова матриця розміру  $n \times n$ , яка визначає вплив дисперсії помилки на значення критерію  $e$ ;  $C$  – невід’ємно визначена поліноміальна вагова матриця розміру  $m \times m$ , яка обмежує дисперсію сигналу керування  $u$ . Задача визначення елементів матриць вагових коефіцієнтів  $R$  та  $C$ , детально викладено в роботах [6], і полягає у тому, щоб за відомими особливостями динаміки об’єкта стабілізації та фізичним змістом компонентів векторів його вихідних координат  $x$  і сигналів керування  $u$  встановити нормативні значення шуканих матриць  $R^o$ ,  $C^o$  та визначити зв’язок між ними та  $R$ ,  $C$ .

Підставивши визначення (6) та визначення (7), в критерій якості системи стабілізації (11) визначимо функціонал критерію якості для двоконтурної слідкуючої системи:

$$e = \left\langle x_{\varepsilon_1}' (K_0^{-1})' \begin{bmatrix} O_n \\ E_n \end{bmatrix} R \begin{bmatrix} O_n & E_n \end{bmatrix} (K_0^{-1}) x_{\varepsilon_1} \right\rangle + \langle u' C u \rangle. \quad (12)$$

Введемо позначення

$$R_1 = (K_0^{-1})' \begin{bmatrix} O_n \\ E_n \end{bmatrix} R \begin{bmatrix} O_n & E_n \end{bmatrix} (K_0^{-1}) = \begin{bmatrix} O_n & O_n \\ O_n & K_0^{-1} R K_0 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

з врахуванням вираження (13) вираз (12) перетворюється на рівняння

$$e = \langle x_{\varepsilon_1}' R_1 x_{\varepsilon_1} \rangle + \langle u' C u \rangle. \quad (14)$$

У випадку з корекцією по збуренню, ланцюг на рисунку 1 позначено штриховими лініями, система рівнянь (3) доповнюється рівнянням:

$$E_n c = O_n + L_1 \Psi_{ob}, \quad (15)$$

де  $c = y_l = L_1 \Psi_{ob}$ .

В такому випадку можна записати нову систему рівнянь для двоконтурної слідкувальної системи в векторно-матричній формі:

$$\begin{bmatrix} P_0 & O_n & O_n \\ E_n & E_n & O_n \\ O_n & O_n & E_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \varepsilon_x \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_0 \\ O_{n \times m} \\ O_{n \times m} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \Psi_{ob} \\ r_0 \\ L_1 \Psi_{ob} \end{bmatrix}.$$

Введемо нові позначення:

$$P_{10} = \begin{bmatrix} P_0 & O_n & O_n \\ E_n & E_n & O_n \\ O_n & O_n & E_n \end{bmatrix}, \quad M_{10} = \begin{bmatrix} M_0 \\ O_{n \times m} \\ O_{n \times m} \end{bmatrix}, \quad x_c = \begin{bmatrix} x_1 \\ \varepsilon_x \\ c \end{bmatrix}, \quad \Psi_L = \begin{bmatrix} \Psi_{ob} \\ r_0 \\ L_1 \Psi_{ob} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

де  $P_{10}$  – розширена поліноміальна матриця розмірності  $n \times n$ , яка характеризує динаміку об’єкта керування;  $x_c$  – розширений вектор реакцій;  $M_{10}$  – розширена поліноміальна матриця розмірності  $n \times m$ , яка визначає чутливість об’єкта до зміни сигналів керування;  $\Psi_L$  – розширений вектор стаціонарних випадкових збурень в об’єкті керування.

Враховуючи позначення (16), рівняння (1), можна записати так:

$$P_{10} x_c = M_{10} u + \Psi_L. \quad (17)$$

По аналогії з рівнянням (6) можна записати наступне рівняння:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ \varepsilon_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & O_n & O_n \\ O_n & K_2 & O_n \\ O_n & O_n & L_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \varepsilon_x \\ c \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Введемо позначення

$$x_{c_0} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \varepsilon_1 \\ y_1 \end{bmatrix}, \quad K_{10} = \begin{bmatrix} K_1 & O_n & O_n \\ O_n & K_2 & O_n \\ O_n & O_n & L_1 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Як видно з рисунка 1, на вході регулятора  $W_0$  діють вектори  $x_3, y_2$  та  $\varepsilon_2$ , по аналогії з першим варіантом, для системи слідкування з корекцією по збуренню можна записати наступне рівняння:

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ \varepsilon_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \varepsilon_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_r \\ \phi_L \end{bmatrix},$$

введемо позначення:

$$\phi_{10} = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_r \\ \phi_L \end{bmatrix}. \tag{20}$$

З врахуванням рівняння (18) та позначень (19), (16), (20) отримуємо:

$$\begin{bmatrix} x_3 \\ \varepsilon_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = K_{10}x_c + \phi_{10}.$$

Рівняння сигналу керування  $u$  можна визначити, як:

$$u = W_3(-W_1x_3 + W_2\varepsilon_2 - W_4y_2),$$

а в матричній формі

$$u = W_3 \begin{bmatrix} -W_1 & W_2 & -W_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ \varepsilon_2 \\ y_2 \end{bmatrix},$$

або

$$u = W_0(K_{10}x_c + \phi_{10}), \tag{21}$$

де  $W_0 = W_3 \begin{bmatrix} -W_1 & W_2 & -W_4 \end{bmatrix}$ .

Таким чином, двоконтурна слідкувальна система еквівалентна за структурою, рівняннями об'єкта (17) та регулятора (21) системі стабілізації, яка зображена на рисунку 2.

Функціонал критерію якості для двоконтурної слідкуючої системи з корекцією по збуренню визначається аналогічно, як для двоконтурної слідкуючої системи. По аналогії з рівнянням функціоналу критерію якості (11) з врахуванням рівняння (17) та визначення (16), (19) отримуємо:

$$e_{10} = \left\langle x_{c_0}' (K_{10}^{-1})' \begin{bmatrix} O_n \\ E_n \\ O_n \end{bmatrix} R \begin{bmatrix} O_n & E_n & O_n \end{bmatrix} (K_{10}^{-1}) x_{c_0} \right\rangle + \langle u' C u \rangle, \tag{22}$$

введемо позначення

$$R_{10} = (K_{10}^{-1})' \begin{bmatrix} O_n \\ E_n \\ O_n \end{bmatrix} R \begin{bmatrix} O_n & E_n & O_n \end{bmatrix} (K_{10}^{-1}) = \begin{bmatrix} O_n & O_n & O_n \\ O_n & K_0^{-1} R K_0 & O_n \\ O_n & O_n & O_n \end{bmatrix}. \tag{23}$$

З врахуванням вираження (23), вираз (22) перетворюється на рівняння:

$$e_{10} = \langle x_{c_0}' R_{10} x_{c_0} \rangle + \langle u' C u \rangle. \tag{24}$$

### Висновки

Таким чином, розроблено новий алгоритм, який дозволяє поширити методи вирішення задач дослідження систем стабілізації у частотній області на випадок дослідження оптимальних двоконтурних системи слідкування та системи слідкування з введенням корекції по збуренню системи керування рухом РП платформи Стюарта. Даний алгоритм побудовано на технології структурного перетворення слідкувальних систем до еквівалентних систем стабілізації. Таке перетворення формалізує і істотно спрощує розв'язання задач аналізу і синтезу складних динамічних систем, таких як систем керування рухом РП платформи Стюарта. Структурні перетворення представлені в даній роботі дозволяють звести задачу синтезу оптимальної системи стабілізації до визначення

структури і параметрів матриці передавальних функцій регулятора  $W_0$  за відомими поліноміальними і дробово-раціональними матрицями  $M_1$ ,  $P_1$ , та  $K_0$  при забезпеченні стійкості системи стабілізації та мінімуму функціоналу критерію якості (14) та (24).

#### Список використаної літератури

1. Stewart D. A platform with 6 degrees of freedom. Proc. of the Institution of mechanical engineers, 180 (Part 1, 15), 1965. P. 371–386.
2. Gough, V.E. and Whitehall, S.G., Universal tyre test machine. Proceedings of the FISITA Ninth International Technical Congress. 1962. May. P. 117–137.
3. Hamid D. Taghirad. Parallel Robots. Mechanics and Control. CRC Press; 1 edition, by Taylor & Francis Group, 2013, 533 p.
4. Merlet J.-P. Parallel Robots. Springer, 2nd edition, 2006. 394 p.
5. Зозуля В.А., Осадчий С.І. Огляд методів побудови систем керування механізмом паралельної кінематичної структури на основі платформи Стюарта (гексапод). Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2019. Т. 11 № 3. С. 23–31. DOI:10.15673/atbp.v11i3.1504
6. Блохін Л.М., Буриченко М.Ю., Білак Н.В., [та ін.]. Статистична динаміка систем управління: підручник. К.: НАУ. 2014. 300 с.
7. Александров Є.Є. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами: Навч. посібник: у 4 т. Т. 2: Автоматичне керування рухом літальних апаратів/ Є.Є. Александров, Е.П. Козлов, Б.І. Кузнецов; за заг.ред. Є.Є. Александрова – Харків: НТУ“ХПІ”, 2006. 528 с.
8. Osadchiy S.I., Zozulya V.A. Combined method for the synthesis of optimal stabilization systems of multidimensional moving objects under stationary random impacts. Automation and Information Sciences. 2013. Vol. 45, Issue 6. P. 25–35.
9. Kvakernaak H., Sivan R. Linear optimal control systems. New York: John Wiley & Son Inc., 1972. 575 p.
10. Horn R. A., Johnson C. R. Matrix Analysis. Cambridge University Press (2nd ed.), 2012. 643 p. DOI: 10.1017/CBO9781139020411.

#### References

1. Stewart D. A platform with 6 degrees of freedom. Proc. of the Institution of mechanical engineers, 180 (Part 1, 15), 1965. P. 371–386.
2. Gough, V.E. and Whitehall, S.G., Universal tyre test machine. Proceedings of the FISITA Ninth International Technical Congress. 1962. May. P. 117–137.
3. Hamid D. Taghirad. Parallel Robots. Mechanics and Control. CRC Press; 1 edition, by Taylor & Francis Group, 2013, 533 p.
4. Merlet J.-P. Parallel Robots. Springer, 2nd edition, 2006. 394 p.
5. Zozulya V.A., Osadchyi S.I. (2019) Ohliad metodiv pobudovy system keruvannya mekhanizmom paralelnoi kinematychnoi struktury na osnovi platformy Stiuarta (heksapod) [Review of methods for constructing control systems for a parallel kinematic structure mechanism based on the Stewart platform (hexapod)]. *Automation of technological and business processes*, vol. 11, no. 3, pp. 23–31. DOI:10.15673/atbp.v11i3.1504
6. Blokhin L.M., Burychenko M.YU., Bilak N.V., [ta in.] (2014). *Statystychna dynamika system upravlinnya* [Statistical dynamics of control systems]. Kyiv: NAU. (in Ukrainian)
7. Aleksandrov Ye.Ye., Kozlov E.P., Kuznietsov B.I. (2006) *Avtomatychne keruvannya rukhomymy obiektamy i tekhnolohichnymy protsesamy: Navch. posibnyk: u 4 t. T. 2: Avtomatychne keruvannya rukhom litalnykh aparativ* [Automatic control of moving objects and technological processes: Textbook: in 4 vols. Vol. 2: Automatic control of aircraft movement]. Kharkiv: NTU“KhPI”. (in Ukrainian)
8. Osadchiy S.I., Zozulya V.A. Combined method for the synthesis of optimal stabilization systems of multidimensional moving objects under stationary random impacts. Automation and Information Sciences. 2013. Vol. 45, Issue 6. P. 25–35.
9. Kvakernaak H., Sivan R. Linear optimal control systems. New York: John Wiley & Son Inc., 1972. 575 p.
10. Horn R. A., Johnson C. R. Matrix Analysis. Cambridge University Press (2nd ed.), 2012. 643 p. DOI: 10.1017/CBO9781139020411.

О. В. ЗОЛОТАРЬОВА

кандидат педагогічних наук, доцент,  
доцент кафедри хімічної інженерії та екології  
Східноукраїнський національний університет  
імені Володимира Даля  
ORCID: 0000-0002-3045-8229

## ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ КРИСТАЛІЗАЦІЇ КАРБОНАТУ КАЛЬЦІЮ З РІДКИХ ВІДХОДІВ СОДОВОГО ВИРОБНИЦТВА

В даній роботі розглянуті кінетичні характеристики процесу кристалізації карбонату кальцію з рідких відходів содового виробництва.

Нами було досліджено, що існує можливість реалізації процесу осадження карбонату кальцію за умов діючого аміачного процесу одержання кальцинованої соди, використовуючи при цьому відходи содового виробництва. Це дозволить одночасно отримати товарний продукт високої якості та вирішити деякі екологічні проблеми заводів з виробництва содо продуктів.

Кінетику процесу кристалізації карбонату кальцію з розчинів вивчали шляхом встановлення залежності ступенів осадження іонів  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  та  $\text{CO}_3^{2-}$  від часу за умов стехіометричного співвідношення реагуючих речовин при температурах 50, 70, 90°C. Результати досліджень показали, що підвищення температури призводить до зростання ступенів осадження відповідних іонів, що пояснюється зниженням розчинності  $\text{CaCO}_3$ .

Встановлено, що зниження розчинності хімічно осадженого карбонату кальцію в розчині хлориду натрію з ростом температури пояснюється тим, що  $\text{CaCO}_3$  відноситься до речовин, що мають зворотну розчинність. Хоча  $\text{NaCl}$  підвищує розчинність карбонату кальцію, але згідно рівнянню "сольового" ефекту визначено, що як у чистому розчиннику, так і у розчині хлориду натрію, розчинність  $\text{CaCO}_3$  знижується під час зростання температури.

Також, досліджено кінетичні характеристики процесу кристалізації карбонату кальцію (константа швидкості та порядок реакції). Шляхом обробки експериментальних даних, які стосуються ступеня осадження іонів кальцію, встановлено, що швидкість кристалізації  $\text{CaCO}_3$  описується кінетичним рівнянням другого порядку. Про це свідчить незмінність константи швидкості реакції протягом часу при певній температурі.

Розроблено кінетичну модель процесу кристалізації карбонату кальцію, що встановлює залежність ступеня осадження  $\text{CaCO}_3$  від температури, часу та абсолютного пересичення вихідного розчину.

На основі температурної залежності константи швидкості процесу відповідно до рівняння Ареніуса були встановлені значення передекспоненціального множника  $k_0 = 236,6060 \text{ моль}^{-1} \cdot \text{дм}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , енергія активації  $E = 22,824 \text{ кДж/моль}$  та константи швидкості при температурі 383°C,  $k = 0,1059 \text{ моль}^{-1} \cdot \text{дм}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ .

Значення енергії активації свідчить про те, що процес кристалізації карбонату кальцію за даних умов проходить у дифузійно-кінетичній (перехідній) області. Таким чином, швидкість процесу кристалізації визначатиметься пересиченням вихідного розчину, ступенем перемішування реакційного середовища, температурою та хімічним складом рідинної фази.

**Ключові слова:** кристалізація, карбонат кальцію, осадження, енергія активації, комплексометричний метод, фільтрат.

O. V. ZOLOTAROVA

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Chemical Engineering and Ecology  
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University  
ORCID: 0000-0002-3045-8229

## DETERMINATION OF KINETIC CHARACTERISTICS OF CALCIUM CARBONATE CRYSTALLIZATION PROCESS FROM LIQUID WASTE OF SODA PRODUCTION

In this work, the kinetic characteristics of the crystallization process of calcium carbonate from liquid waste of soda production are considered.

We have investigated that there is a possibility of implementing the process of precipitation of calcium carbonate under the conditions of an operating ammonia process for the production of soda ash, while using soda ash production waste. This will make it possible to simultaneously obtain a high-quality commercial product and solve some environmental problems of factories producing soda products.

The kinetics of the crystallization process of calcium carbonate from solutions was studied by establishing the dependence of the degrees of precipitation of  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  and  $\text{CO}_3^{2-}$  ions on time under conditions of stoichiometric ratio

of reactants at temperatures of 50, 70, 90°C. The results of the research showed that an increase in temperature leads to an increase in the degree of precipitation of the corresponding ions, which is explained by a decrease in the solubility of  $\text{CaCO}_3$ .

It was established that the decrease in the solubility of chemically precipitated calcium carbonate in sodium chloride solution with increasing temperature is explained by the fact that  $\text{CaCO}_3$  belongs to substances with inverse solubility. Although  $\text{NaCl}$  increases the solubility of calcium carbonate, according to the equation of the "salt" effect, it is determined that both in a pure solvent and in a solution of sodium chloride, the solubility of  $\text{CaCO}_3$  decreases with increasing temperature.

Also, the kinetic characteristics of the calcium carbonate crystallization process (rate constant and reaction order) were investigated. By processing experimental data related to the degree of deposition of calcium ions, it was established that the rate of crystallization of  $\text{CaCO}_3$  is described by a second-order kinetic equation. This is evidenced by the invariance of the reaction rate constant over time at a certain temperature.

A kinetic model of the calcium carbonate crystallization process was developed, which establishes the dependence of the degree of precipitation of  $\text{CaCO}_3$  on temperature, time, and absolute supersaturation of the initial solution.

Based on the temperature dependence of the process rate constant according to the Arrhenius equation, the values of the pre-exponential factor  $k_0 = 236.6060 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , the activation energy  $E = 22.824 \text{ kJ/mol}$ , and the rate constants at a temperature of 383°C,  $k = 0.1059 \text{ mol}^{-1} \cdot \text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

The value of the activation energy indicates that the calcium carbonate crystallization process under these conditions takes place in the diffusion-kinetic (transitional) region. Thus, the speed of the crystallization process will be determined by the saturation of the initial solution, the degree of mixing of the reaction medium, the temperature, and the chemical composition of the liquid phase.

**Key words:** crystallization, calcium carbonate, precipitation, activation energy, complexometric method, filtrate.

### Постановка проблеми

Хімічно осаджений карбонат кальцію виробляється в Україні в обмеженій кількості, а потреби господарства задовольняються за рахунок імпорту продукту з інших країн. Існуюча технологія виробництва хімічно осадженого карбонату кальцію (вапняний спосіб) має низку недоліків енергетичного та технологічного плану. Крім цього, через природні властивості використовуваної сировини цей спосіб не має значних резервів для підвищення якісних показників продукту. В зв'язку з цим виникає потреба в розробці більш досконалої технології виробництва.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблеми дослідження кінетичних характеристик процесу кристалізації карбонату кальцію з рідких відходів содового виробництва розглядалися у роботах Михайлової Є. О., Ворожбіян М. І., Мороз М. О. та інших вчених. Однак і сьогодні під час проведення експерименту, дана проблема викликає багато запитань.

### Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є визначення кінетичних характеристик процесу кристалізації карбонату кальцію з дистилерної рідини виробництва кальцинованої соди аміачним способом та надлишкового маточного розчину виробництва очищеного гідрокарбонату натрію, а саме виведення кінетичної моделі процесу кристалізації карбонату кальцію з вихідних розчинів та встановлення головних кінетичних характеристик – константи швидкості та порядку реакції).

### Викладення основного матеріалу дослідження

Процес кристалізації карбонату кальцію буде здійснюватиметься при використанні вихідних розчинів з концентраціями компонентів, з якими вони утворюються в відповідних виробництвах. Це пояснюється тим, що розбавлення вихідних розчинів у будь-яку кількість разів призводить до одержання осадів карбонату кальцію з високою насипною густиною, а збільшення концентрації можливо досягти шляхом випарювання, що потребує значних енергетичних витрат та призведе до ускладнення технологічної схеми одержання хімічно осадженого карбонату кальцію [1].

Утворення осаду карбонату кальцію проводитиметься за умови стехіометричного співвідношення вихідних реагентів, оскільки мольне співвідношення реагуючих речовин незначно впливає на якість одержаного хімічного осадженого карбонату кальцію. Крім того, об'єми надлишкового маточного розчину, що утворюються в виробництві очищеного гідрокарбонату натрію, набагато менші ніж потрібно для повної утилізації відповідних об'ємів дистилерної рідини виробництва кальцинованої соди. Процес кристалізації карбонату кальцію буде досліджуватися при температурах 50, 70, 90°C. Нижня температурна межа процесу була вибрана відповідно до політерми розчинності в системі  $\text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{NaHCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ . Це пояснюється тим, що в розчиненому вигляді карбонат і гідрокарбонат натрію, масова частка яких становить 4,72 і 12,95% відповідно, можуть одночасно існувати тільки при температурі вище 35–50°C. В іншому випадку ці солі кристалізуються, що буде впливати на повноту процесу осадження та якість одержаного хімічно осадженого карбонату кальцію.

Час процесу утворення осаду карбонату кальцію буде становити від 1 до 10 хв., аби уникнути перекристалізації та зростання частинок карбонату кальцію результатом чого є утворення грубодисперсного осаду. За початок процесу приймається момент початку змішування вихідних реагентів, а за кінець – повну їх витрату за встановлений час.

Кристалізація карбонату кальцію відбувається в реакторі-осаджувачі, до якого одночасно подаються освітлена дистильована рідина та надлишковий маточний розчин, що попередньо підігріваються до відповідної температури в збірника. Утворення осаду карбонату кальцію відбувається в заданому температурному режимі при постійному перемішуванні реакційної суміші за допомогою механічної мішалки, число обертів якої становить 500 об./хв. Температура вихідних розчинів та реакційного середовища контролюється ртутними термометрами [2].

Після завершення процесу кристалізації суспензії хімічно осадженого карбонату кальцію направляється на фільтрацію. Відділення осаду карбонату кальцію від маточного розчину відбувається на вакуум-фільтрі, який складається з вакуум-наосу, колби Бунзена та фільтрувальної лійки Бюхнера. Одержаний осад відмивається на фільтрі дистильованою водою від іонів хлору, а потім висушується в сушильній шафі при температурі 110–115°C до постійної маси.

Отриманий після фільтрації маточний розчин аналізується на вміст іонів  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  та  $\text{CO}_3^{2-}$ .

#### Визначення іонів $\text{Ca}^{2+}$ в фільтраті

Встановлення концентрації іонів кальцію в фільтраті виконується комплексометричним методом, що ґрунтується на взаємодії  $\text{Ca}^{2+}$  з індикатором у лужному середовищі з утворенням забарвленої комплексної сполуки.

10 см<sup>3</sup> фільтрату, що вимірюється піпеткою, поміщають до конічної колби місткістю 250 см<sup>3</sup>, куди додається 1 крапля індикатора метилового червоного. Вміст колби нейтралізується 1Н розчином хлоридної кислоти до встановлення рожевого забарвлення розчину. Об'єм розчину доводиться до 100 см<sup>3</sup> дистильованою водою, після чого додається 10 см<sup>3</sup> 2Н розчину гідроксиду калію та додається 0,1 г сухої суміші індикатора мурексиду. Отриманий розчин титрується з бюретки 0,1Н розчином трилону Б до переходу забарвлення розчину від малинового до бузкового.

Концентрацію іонів кальцію в фільтраті  $C(\text{Ca}^{2+})$  в нормальних поділках (н. п.) розраховується за формулою

$$C(\text{Ca}^{2+}) = \frac{V_1 \cdot K \cdot 20}{V \cdot 10},$$

За результат аналізу приймається середнє арифметичне результатів двох паралельних вимірювань, абсолютне розходження між якими не перевищує 0,8–1,0 н.п.

#### Визначення іонів $\text{HCO}_3^-$ та $\text{CO}_3^{2-}$ в фільтраті

5 см<sup>3</sup> фільтрату відбирають піпеткою і переносять до двох конічних колб місткістю 500 см<sup>3</sup>, куди приливають по 25–30 см<sup>3</sup> дистильованої води. До однієї колби додають 3–4 краплі розчину метилового оранжевого, після чого її вміст титрують 1Н розчином хлоридної кислоти до зміни забарвлення індикатора з жовтого у рожевий ( $V_1$ ). До другої колби з бюретки приливають 10 см<sup>3</sup> 1Н розчину гідроксиду натрію, після чого вміст колби підігрівають до кипіння. До гарячого розчину приливають 25 см<sup>3</sup> розчину хлориду барію з масовою часткою 20%. Одержаний розчин ретельно перемішують, колбу закривають кришкою і залишають у спокої на 5 хвилин. Потім до колби додають 3–4 краплі розчину фенолфталеїну, і її вміст титрують 1Н розчином хлоридної кислоти до зникнення рожевого забарвлення індикатора ( $V_2$ ). Одночасно за цих самих умов проводиться холостий дослід без додавання розчинів гідроксиду натрію і хлориду барію ( $V_3$ ).

Концентрація гідрокарбонатних іонів  $C(\text{HCO}_3^-)$  в н.п. у фільтраті визначається за формулою

$$C(\text{HCO}_3^-) = \frac{(V_3 - V_2) \cdot K \cdot 20}{V}.$$

Вміст карбонатних іонів  $C(\text{CO}_3^{2-})$  в н.п. у фільтраті розраховується відповідно до рівняння

$$C(\text{CO}_3^{2-}) = \frac{V_1 \cdot K \cdot 20}{V} - C(\text{HCO}_3^-).$$

За результат аналізу приймається середнє арифметичне результатів двох паралельних вимірювань, абсолютне розходження між якими не перевищує 1,0 н.п.

У содовому виробництві концентрація солей у розчинах вимірюється у н.п. (нормальні поділки) – це 1/20 моль-еквівалента компонента в 1 дм<sup>3</sup> розчину. Для перерахунку н.п. в г/дм<sup>3</sup> використовуються спеціальні формули [3].

#### Результати експерименту

Кінетика процесу кристалізації карбонату кальцію досліджується шляхом встановлення залежності ступенів осадження реагуючих речовин від часу при стехіометричному співвідношенні вихідних реагентів і температурах 50, 70, 90° С. Ступінь осадження визначається відповідно до результатів аналізів фільтрату на залишковий вміст у ньому іонів  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  та  $\text{CO}_3^{2-}$  і розраховується за формулою:

$$\alpha = \frac{C_{\text{н}} - C_{\text{к}}}{C_{\text{н}}} \cdot 100\%,$$

Аналіз даних показав, що підвищення температури процесу призводить до збільшення ступеня осадження як іонів  $\text{Ca}^{2+}$ , які містяться в освітленій дистилерній рідині, так й іонів  $\text{HCO}_3^-$  та  $\text{CO}_3^{2-}$ , що входять до складу надлишкового маточного розчину. Це в свою чергу свідчить про те, що залишкові концентрації відповідних іонів у фільтраті зменшуються за умов підвищених температур. Тобто високі температури сприяють більш повному осадженню вихідних речовин за більш короткий проміжок часу [4].

Це можна пояснити тим, що обмінна реакція утворення молекул карбонату кальцію відповідно до хімічних рівнянь проходить практично миттєво. Тому після змішування вихідних реагентів швидкість досягнення хімічної рівноваги визначатиметься швидкістю переходу молекул, що утворились, у тверду фазу, а повнота зв'язування іонів кальцію – розчинністю карбонату кальцію в розчині хлориду натрію при відповідній температурі. Розчинність карбонату кальцію в розчині хлориду натрію з різною концентрацією зменшується при підвищенні температури. Крім цього, карбонат кальцію схильний до утворення пересичених метастабільних розчинів, встановлення істинної рівноваги яких може тривати протягом багатьох годин. А високі температури та інтенсивне перемішування реакційного середовища прискорює усунення ступеня пересичення розчину. А це в свою чергу сприяє більш повному виділенню хімічно осадженого карбонату кальцію в вигляді кристалічного осаду.

Час проведення процесу кристалізації визначатиметься необхідним ступенем осадження вихідних речовин, а також якістю одержаного карбонату кальцію. Аналіз даних вказує на те, що протягом 3 хв. можливо досягти максимального ступеня осадження всіх іонів за даних умов. Подальше збільшення часу не призводить до його підвищення.

Під час здійснення процесу кристалізації карбонату кальцію при стехіометричному співвідношенні вихідних реагентів і температурах від 50 до 90°C ступені осадження іонів  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  та  $\text{CO}_3^{2-}$  взаємопов'язані між собою.

Як видно ступінь осадження карбонатного іону в кожному окремому випадку завжди вище ступеня осадження гідрокарбонатного іону. Це можна пояснити більш високою розчинністю кислої солі кальцію порівняно з основою сіллю –  $\text{CaCO}_3$ . Крім цього, підвищення ступеня осадження гідрокарбонатних іонів при зростанні температури пов'язано з тим, що за цих умов розчинність  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  зменшується. Це відбувається за рахунок розкладання кислої солі з утворенням  $\text{CaCO}_3$  та діоксиду вуглецю відповідно до хімічної реакції [5].

Чітка взаємозалежність ступенів осадження свідчить про однаковий закон осадження всіх іонів і надає можливість створення єдиної моделі, яка буде описувати кінетику процесу утворення карбонату кальцію.

Виведення кінетичної моделі процесу кристалізації карбонату кальцію з вихідних розчинів та встановлення головних кінетичних характеристик (константи швидкості та порядку реакції) здійснюється з застосуванням загальних рівнянь кінетики хімічних реакцій. Формальне застосування цих рівнянь дає позитивний результат при описі процесів кристалізації. Причому, в ролі концентрації реагуючих речовин використовується пересичення розчину, що є рушійною силою при утворенні осаду.

У загальному вигляді швидкість осадження речовини описується рівнянням:

$$\frac{dx}{d\tau} = -\frac{d(\Delta C - x)}{d\tau} = k \cdot (\Delta C - x)^n,$$

Відомо, що кристалізація може протікати відповідно до рівняння як першого, так і другого порядку. Порядок реакції залежатиме від природи солі, що осаджується, температури, ступеня перемішування розчину та наявності домішок. У зв'язку з тим, що швидкість процесу визначається сумою факторів на підставі загальних відомостей про гідродинамічні умови і дані про ступінь пересичення розчину неможливо сказати, якому порядку відповідає процес осадження.

Для визначення порядку реакції необхідно розрахувати константу швидкості процесу для кожного можливого випадку ( $n = 1$  і  $n = 2$ ). Порядок реакції буде вибрано правильно, якщо значення константи швидкості  $k$  при даній постійній температурі не буде змінюватися протягом часу. За цих умов середня відносна похибка розрахунків  $\bar{\Delta}$  не повинна перевищувати 10%.

Для порядку реакції  $n = 1$  рівняння швидкості має вигляд:

$$-\frac{d(\Delta C - x)}{d\tau} = k \cdot (\Delta C - x).$$

Після розділення перемінних та їх інтегрування у межах від 0 до  $\tau$  та 0 до  $x$  одержуємо вираз для константи швидкості реакції першого порядку:

$$k = \frac{1}{\tau} \ln \frac{\Delta C}{\Delta C - x}.$$

В нашому випадку абсолютне пересичення вихідного розчину (освітленої дистилерної рідини)  $\Delta C$  відповідно до іонів кальцію з урахуванням даних табл. 1 дорівнює 1,35 моль/дм<sup>3</sup>.

Оскільки у нас немає даних відносно  $x$ , то виразимо його через ступінь осадження  $\alpha$ .

$$x = \Delta C \cdot \alpha.$$

Таблиця 1

## Розчинність карбонату кальцію в розчині хлориду натрію

Температура, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Розчинність CaCO <sub>3</sub> , г/дм <sup>3</sup>	0,172	0,148	0,138	0,110	0,093	0,081	0,069	0,059	0,051	0,044	0,038

Тоді рівняння, що описує константу швидкості набуває вигляду:

$$k = \frac{1}{\tau} \ln \frac{1}{1-\alpha}.$$

Значення ступенів осадження іонів кальцію за умов різних температур наведено у табл. 2. Для проведення розрахунків було обрано експериментальні дані, що стосуються часу від 0 до 3-х хвилин. Саме на цьому відрізку процес проходить найбільш інтенсивно. Після 3-х хвилин ступінь осадження карбонату кальцію, а отже і швидкість процесу практично не змінюються протягом часу.

Результати розрахунків значень констант швидкості кінетичного рівняння першого порядку за умов різного часу згідно рівняння при температурах 50, 70, 90°C відповідно представлено у табл. 3.

Таблиця 2

Залежність ступеня осадження іонів Ca<sup>2+</sup> від часу та температури процесу

Час, с	Ступінь осадження, д.о.		
	50°C	70°C	90°C
30	0,676	0,729	0,801
60	0,809	0,856	0,919
120	0,886	0,927	0,956
180	0,916	0,954	0,969

Таблиця 3

Значення констант швидкості за умов  $n = 1$ 

Час, с	Константа швидкості, к, с <sup>-1</sup>		
	50°C	70°C	90°C
30	0,0376	0,0435	0,0538
60	0,0276	0,0323	0,0419
120	0,0181	0,0218	0,0260
180	0,0138	0,0171	0,0193
Середнє значення константи швидкості, $\bar{k}$ , с <sup>-1</sup>	0,0243	0,0287	0,0353
Середня відносна похибка, $\bar{\delta}$ , %	34,3	32,2	35,8

Відносну похибку розрахунків визначали наступним чином:

$$\bar{\delta} = \frac{k - \bar{k}}{\bar{k}} \cdot 100\%.$$

Дані табл. 3 показують, що значення констант швидкості для кінетичного рівняння першого порядку поступово зменшуються при збільшенні часу здійснення процесу осадження. Тобто  $k = f(\tau)$ , а середня відносна похибка  $\bar{\delta} > 10\%$ .

Взагалі систематичне зменшення константи швидкості протягом часу є ознакою зниження припустимого порядку реакції. Таким чином, можна зробити висновок, що порядок реакції утворення хімічно осадженого карбонату кальцію вище за одиницю.

Для випадку  $n = 2$  швидкість процесу кристалізації карбонату кальцію описується наступним рівнянням:

$$-\frac{d(\Delta C - x)}{dt} = k \cdot (\Delta C - x)^2.$$

Тоді константу швидкості можливо розрахувати за формулою:

$$k = \frac{1}{\tau} \cdot \left( \frac{1}{\Delta C - x} - \frac{1}{\Delta C} \right).$$



Враховуючи рівняння (24), вираз (28) приймає вигляд

$$k = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{1}{\Delta C} \cdot \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

Результати розрахунків константи швидкості відповідно до рівняння наведено у табл. 4.

Таблиця 4

Значення констант швидкості за умов  $n = 2$ 

Час, с	Константа швидкості, к, моль <sup>-1</sup> ·дм <sup>3</sup> ·с <sup>-1</sup>		
	50°C	70°C	90°C
30	0,0517	0,0665	0,0994
60	0,0525	0,0733	0,1403
120	0,0477	0,0786	0,1343
180	0,0449	0,0854	0,1291
Середнє значення константи швидкості, $\bar{k}$ , моль <sup>-1</sup> ·дм <sup>3</sup> ·с <sup>-1</sup>	0,0492	0,0758	0,1258
Середня відносна похибка, $\bar{\delta}$ , %	5,9	7,9	10,4

Представлені у табл. 4 значення констант швидкості для кінетичного рівняння другого порядку практично не змінюються за умов різного часу процесу кристалізації. Це свідчить про те, що порядок реакції вибрано вірно, а кінетичне рівняння адекватно експериментальним даним, що наведено у табл. 2.

Рівняння швидкості у диференціальному вигляді не дуже зручне для користування на практиці. Перетворивши його у вигляді функції ступеня осадження карбонату кальцію від часу, температури та початкового пересичення вихідного розчину, можна отримати кінетичну модель процесу кристалізації карбонату кальцію, яка має наступний вигляд:

$$\alpha = \frac{k \cdot \tau \cdot \Delta C}{1 + k \cdot \tau \cdot \Delta C}.$$

Таким чином, було встановлено, що процес кристалізації карбонату кальцію з освітленої дистилерної рідини та надлишкового маточного розчину виробництва очищеного гідрокарбонату натрію за умов стехіометричного співвідношення реагуючих речовин описується кінетичним рівнянням другого порядку згідно формулі (30), а значення констант швидкості при температурах 50, 70, 90°C складають 0,0492, 0,0758 та 0,1258 моль<sup>-1</sup>·дм<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup> відповідно [5].

Під час розроблення кінетичної моделі було одержано низку значень констант швидкості процесу кристалізації карбонату кальцію в залежності від температури, які дали можливість розрахувати енергію активації і оцінити область проходження процесу. Дія температури на константу швидкості описується рівнянням Ареніуса:

$$k = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T}\right),$$

Логарифмування рівняння надає йому вигляду:

$$\ln k = \ln k_0 - \frac{E}{RT}.$$

Для визначення енергії активації процесу кристалізації карбонату кальцію було побудовано графік у вигляді лінійної залежності логарифму константи швидкості від зворотної температури  $\ln k = f(1/T)$ .

На основі розрахунків було одержано емпіричне рівняння:

$$\ln k = 5,4664 - 2745,1 \frac{1}{T}.$$

Звідки  $E / R = 2745,1$  та  $\ln k_0 = 5,4664$ . Тоді передекспоненціальний множник дорівнюватиме  $k_0 = 236,6060$  моль<sup>-1</sup>·дм<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>, а енергія активації –  $E = 22,824$  кДж/моль.

Відповідно до рівняння можливо розрахувати константу швидкості при оптимальній температурі процесу кристалізації карбонату кальцію 83°C (356K), яка становитиме  $k = 0,1059$  моль<sup>-1</sup>·дм<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>. Ступінь осадження хімічно осадженого карбонату кальцію за цих умов складатиме 96,5%.

Отримане значення енергії активації свідчить про те, що процес кристалізації карбонату кальцію з розчинів протікає в дифузійно-кінетичній (перехідній) області ( $E = 12,54$ – $25,08$  кДж/моль). Тобто, в цьому випадку швидкості дифузії (переносу розчиненої речовини з глибини розчину до поверхні зростаючого кристалу) та взаємодії на межі розподілу фаз (відкладення речовини, яка кристалізується, на поверхні кристалу) приблизно дорівнюють

одна одній та обидві впливають на швидкість фазового перетворення. Таким чином, на кристалізацію впливатимуть ті фактори, які визначають перераховані вище процеси. До них належать температура, інтенсивність перемішування розчину, наявність у ньому домішок, ступінь пересичення розчину та т.п. [6].

#### Висновки

Встановлено, що зниження розчинності хімічно осадженого карбонату кальцію в розчині хлориду натрію з ростом температури пояснюється тим, що  $\text{CaCO}_3$  відноситься до речовин, що мають зворотну розчинність. Хоча  $\text{NaCl}$  підвищує розчинність карбонату кальцію, але згідно рівнянню «сольового» ефекту визначено, що як у чистому розчиннику, так і у розчині хлориду натрію, розчинність  $\text{CaCO}_3$  знижується під час зростання температури.

Досліджено кінетичні характеристики процесу кристалізації карбонату кальцію (константа швидкості та порядок реакції). Шляхом обробки експериментальних даних, які стосуються ступеня осадження іонів кальцію, встановлено, що швидкість кристалізації  $\text{CaCO}_3$  описується кінетичним рівнянням другого порядку. Про це свідчить незмінність константи швидкості реакції протягом часу при певній температурі.

Розроблено кінетичну модель процесу кристалізації карбонату кальцію, що встановлює залежність ступеня осадження  $\text{CaCO}_3$  від температури, часу та абсолютного пересичення вихідного розчину.

#### Список використаної літератури

1. Михайлова Е. А., Лобойко А. Я., Панасенко В. А. Вирішення проблеми утилізації рідких відходів підприємств содопродуктів // *Збірник наукових статей міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення»*. 2005. Т. 2, С. 68–70.
2. Михайлова Є. О. Одержання осадженого карбонату кальцію з відходів содового виробництва : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.17.01. Харків, 2006. 21 с.
3. Методичні вказівки до розрахунків циліндричних об'єктів сталевих зварювальних посудів та апаратів / А. І. Барвін, І. М. Генкіна, В. В. Іванченко. Сєвєродонецьк : СТІ, 2002. 83 с.
4. Бєдрій Я. І. Охорона праці : навч. посіб. / Я. І. Бєдрій, В. С. Джигирей, А. І. Кидасюк. Львів.: Афїша, 1997. 258 с.
5. Молчанов В. І. Хімічно осаджений карбонат кальцію з рідинних відходів содового виробництва. Технологічні та кінетичні аспекти / В. І. Молчанов, О. Я. Лобойко, Є. О. Михайлова та ін. // *Хімічна промисловість України*. 2006. № 1(72). С. 3–7.
6. Михайлова, Є. О. Спосіб утилізації рідинних відходів виробництва кальцинованої соди [Текст] / Є. О. Михайлова, Н. Б. Маркова, І. В. Багрова, Ю. Г. Гавриш, В. О. Панасенко // *Збірник наукових праць ДУ «НІОХІМ» «Хімія і технологія виробництва основної хімічної промисловості»*. 2013. Т. 77. С. 76–81.

#### References

1. Mykhajlova E. A., Loboiko A. Ja., Panasenکو V. A. (2005) Vyrishennja problemy utylizaciji ridkykh vidkhdov pidpryjemstv sodoproduktiv [Solving the problem of disposal of liquid waste of soda products enterprises]. *Zbirnik naukovikh statei mizhnarodnoi naukovopraktichnoi konferentsii «Ekologichna bezpeka: problemi i shlyakhi virishennya»*, no. 2, pp. 68–70.
2. Mykhailova Ye. O. (2006) Oderzhannia osadzenoho karbonatu kaltsiiu z vidkhdov sodovoho vyrobnytstva [Production of precipitated calcium carbonate from soda ash production waste] (PhD Thesis), Kharkiv.
3. Barvin A. I., Henkina I. M., Ivanchenko V. V. (ed.) (2002) Metodychni vказivky do rozrakhunkiv tsylindrychnykh obichajek stalnykh zvarivvalnykh sosudiv ta aparativ [Methodical guidelines for calculations of cylindrical shells of steel welding vessels and devices]. Sievierodonetsk: STI.
4. Bedrii Ya. I. (1997) Okhorona pratsi: navch. posib. [Labor protection: navch. posib.]. Lviv: Afisha.
5. Molchanov V. I. (2006) Khimichno osadzhenyi karbonat kaltsiiu z ridynnykh vidkhdov sodovoho vyrobnytstva. Technological and kinetic aspects. [Chemically precipitated calcium carbonate from liquid soda ash production waste. Technological and kinetic aspects]. *Khimichna promyslovist Ukrainy*. no. 1 (72), pp. 3–7.
6. Mykhailova Ye. O. (2013) Sposib utylizatsii ridynnykh vidkhdov vyrobnytstva kaltsynovanoi sody [The method of disposal of liquid waste from soda ash production]. *Zbirnyk naukovykh prats «Khimiia i tekhnolohiia vyrobnytstv osnovnoi khimichnoi promyslovosti»*. no. 77, pp. 76–81.

О. В. КИРИЛЛОВА

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт  
Одеський національний морський університет  
ORCID: 0000-0002-3414-7364

Р. І. ГНІДОЙ

аспірант кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт  
Одеський національний морський університет  
ORCID: 0009-0001-9477-3076

## ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ УКРАЇНИ: ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ В КОНТЕКСТІ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ ІНТЕГРАЦІЇ ТА ПРАВОВИХ РЕФОРМ

У статті досліджено перспективи розвитку внутрішнього водного транспорту (ВВТ) України в контексті євроінтеграції та гармонізації законодавства з європейськими стандартами. Проаналізовано сучасний стан національної правової бази та її відповідність міжнародним нормам, зокрема, директивам ЄС щодо транспорту та екологічної стійкості. Особливу увагу приділено викликам, що виникли внаслідок військових дій, та необхідності модернізації інфраструктури та системи фінансування ВВТ. Висвітлено потенціал реформ у сфері ВВТ, зокрема щодо екологічної відповідальності, що є важливим для зменшення впливу транспорту на навколишнє середовище, державної підтримки як ключового фактора стабільного розвитку інфраструктури, а також залучення приватних інвестицій, необхідних для модернізації та фінансового забезпечення галузі.

У статті підкреслено актуальність євроінтеграційного процесу в Україні, який корелюється із сучасними тенденціями розвитку транспорту та необхідністю його інтеграції до європейської транспортної мережі. Розглянуто законодавчі ініціативи, що базуються на нових підходах та змінах у національному правовому полі, висвітлюють перспективи розвитку ВВТ України в контексті європейських директив. Продемонстровано важливість гармонізації українського законодавства з європейськими нормами.

У статті проаналізовано чинний Закон України «Про внутрішній водний транспорт» з позиції економічних, правових, організаційних перспектив. Здійснено порівняння цього документу з подібними європейськими законодавчими актами. Зроблено висновки про те, що відсутність актуального відносно європейських аналогів законодавства є стримуючим фактором для розвитку внутрішнього водного транспорту України.

У статті наголошено, що невизначеність правового статусу річкових портів, терміналів, земель річкового транспорту та гідротехнічних споруд, непрозорі та не завжди обґрунтовані застосування норм морського права до річкового транспорту, відсутність чіткого регулювання прав та обов'язків перевізників, а також взаємодії між господарюючими суб'єктами та державою, включаючи стосунки між портами й вантажовласниками, знижує інвестиційну привабливість річкового транспорту й гальмує розвиток ринку річкових перевезень.

У статті зазначено, що зв'язок між пріоритетами євроінтеграційного курсу України у сфері ВВТ та основними напрямками політики Європейського Союзу щодо розвитку водного транспорту має бути чітко відображеним у законодавчих ініціативах. Це передбачає ретельне врахування директив ЄС у сфері водного транспорту, які необхідно імплементувати в українське національне законодавство відповідно до Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом.

У статті підкреслено, що якнайшвидше доопрацювання Закону України «Про внутрішній водний транспорт» дозволить значно підвищити ефективність функціонування системи ВВТ України, створить передумови її інтеграції до європейської мережі транспортних комунікацій та позитивно вплине на екологічну ситуацію.

**Ключові слова:** внутрішній водний транспорт, річкове судноплавство, інфраструктура, інвестиції, безпека, екологія, охорона навколишнього середовища, Європейське законодавство, гармонізація законодавства.

O. V. KIRILLOVA

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of the Department of Ports Operation and Cargo Operations Technology  
Odesa National Maritime University  
ORCID: 0000-0002-3414-7364

R. I. HNIDOI

Postgraduate Student at the Department of Ports Operation  
and Cargo Handling Technology  
Odesa National Maritime University  
ORCID: 0009-0001-9477-3076

## INLAND WATERWAY TRANSPORT OF UKRAINE: DEVELOPMENT PROSPECTS IN THE CONTEXT OF OF EUROPEAN INTEGRATION AND LEGAL REFORMS

*The article examines the prospects for the development of inland waterway transport (IWT) in Ukraine in the context of European integration and harmonisation of legislation with European standards. The current state of the national legal framework and its compliance with international norms, in particular, EU directives on transport and environmental sustainability, are analysed. Particular attention is paid to the challenges posed by military operations and the need to modernise the infrastructure and financing system of the military-industrial complex. The potential of reforms in the field of IWT is highlighted, in particular in terms of environmental responsibility, which is important for reducing the environmental impact of transport, state support as a key factor in the sustainable development of infrastructure, and attracting private investment necessary for the modernisation and financial support of the industry.*

*The article emphasises the relevance of the European integration process in Ukraine, which correlates with current trends in transport development and the need for its integration into the European transport network. The author considers legislative initiatives based on new approaches and changes in the national legal field, which highlight the prospects for the development of the Ukrainian IWT in the context of European directives. The importance of harmonising Ukrainian legislation with European norms is demonstrated.*

*The article analyses the current Law of Ukraine 'On Inland Waterway Transport' from the standpoint of economic, legal and organisational perspectives. A comparison of this document with similar European legislative acts is made. It is concluded that the absence of legislation that is up-to-date in relation to European analogues is a constraint to the development of inland waterway transport in Ukraine.*

*The article emphasises that the uncertainty of the legal status of river ports, terminals, river transport lands and hydraulic structures, non-transparent and not always justified application of maritime law to river transport, lack of clear regulation of the rights and obligations of carriers, as well as interaction between economic entities and the State, including relations between ports and cargo owners, reduces the investment attractiveness of river transport and hinders the development of the river transport market.*

*The article notes that the link between the priorities of Ukraine's European integration course in the field of inland waterway transport and the main directions of the EU's policy on the development of water transport should be clearly reflected in legislative initiatives. This implies a careful consideration of EU directives in the field of water transport, which should be implemented in Ukrainian national legislation in accordance with the Association Agreement between Ukraine and the European Union.*

*The article emphasises that the speedy finalisation of the Law of Ukraine 'On Inland Water Transport' will significantly improve the efficiency of the Ukrainian inland water transport system, create the prerequisites for its integration into the European transport communications network and have a positive impact on the environmental situation.*

**Key words:** inland waterway transport, river navigation, infrastructure, investments, safety, ecology, environmental protection, European legislation, harmonisation of legislation.

### Постановка проблеми

Для підтримки надійної, ефективної та безпечної роботи транспортної системи України в умовах повномасштабного вторгнення агресора, а також для зміцнення національної економіки, держава та бізнес активізували розвиток та підтримку нових перспективних систем доставки вантажів. Так, унаслідок військових дій значно змінились водні маршрути перевезень вантажів та роботи суден, набуває поширення ідея застосування внутрішнього водного транспорту (ВВТ).

Внутрішні водні шляхи України, що складаються з мережі річок та каналів загальною протяжністю понад 4000 кілометрів, створюють гарні умови для розвитку внутрішньої водної інфраструктури та нових маршрутів доставки вантажів. Це особливо актуально в рамках європейської стратегії сталого розвитку транспорту та зниження викидів парникових газів, пріоритетом якої є переорієнтація перевезень вантажів з автомобільного на морський та внутрішній водний транспорт. Цей процес керується кількома ключовими ініціативами та документами, які визначають політику Європейського Союзу (ЄС) у цій сфері:

– Європейська зелена угода (European Green Deal) [1], що прийнята у 2019 р., ставить перед собою мету зробити економіку ЄС кліматично нейтральною до 2050 р. Одне із ключових завдань цього документу – зменшення викидів від транспорту, що передбачає стимулювання більш стійких транспортних рішень, таких як морські та внутрішні водні перевезення. Політика декарбонізації транспорту згідно з Європейською зеленою угодою визначає курс на зниження частки автомобільних перевезень і збільшення ролі екологічно чистих видів транспорту;

– Транс'європейська транспортна мережа TEN-T (Trans-European Transport Network, TEN-T) [2] – комплексна мережа транспортних шляхів сполучення, яка покликана покращити зв'язок між європейськими країнами та оптимізувати транспортні потоки. Стратегія включає розвиток портів і водних шляхів, а також сприяння мультимодальним та інтермодальним перевезенням для зниження залежності від автомобільного транспорту;

– Стратегія стійкої та розумної мобільності (Sustainable and Smart Mobility Strategy) [3], яка ухвалена у 2020 р., спрямована на підтримку переходу до екологічно чистого транспорту в Європі. Вона передбачає стимулювання

морського та річкового транспорту через інноваційні підходи, включаючи розвиток технологій цифровізації портів (Smart Ports) [4, 5] та посилення інтермодальних рішень [6];

– Морські магістралі (Motorways of the Sea – MoS) [7] – ініціатива ЄС, яка спрямована на інтеграцію морського транспорту в єдину європейську транспортну мережу та орієнтована на заміну автомобільних перевезень водними маршрутами, зокрема вздовж морських прибережних зон та внутрішніх водних шляхів;

– інші Європейські конвенції та міжнародні угоди. Наприклад, Базельська конвенція про міжнародні перевезення відходів та Паризька угода з клімату, які вимагають скорочення викидів і сприяють сталому розвитку транспорту, зокрема водного.

Таким чином, ЄС активно працює над переорієнтацією вантажних потоків з автомобільного транспорту на більш екологічні альтернативи через розробку та реалізацію стратегій, планів, інвестиційних проєктів і програм розвитку морського і внутрішнього водного транспорту.

Отже, розвиток ВВТ України є одним із ключових напрямків, що створює передумови для інтеграції національної транспортної системи в транс'європейську мережу транспортних комунікацій і матиме вагомий вплив на економіку, суспільство та екологію.

Орієнтуючись на вище сказане, збільшується і роль правового забезпечення роботи ВВТ України, а також необхідність гармонізації відповідного українського законодавства з європейськими стандартами.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

За останні кілька років наукова спільнота України неодноразово звертала увагу на ситуацію щодо ефективності роботи внутрішнього водного транспорту (ВВТ) України та законодавчої бази його функціонування.

Дослідження в цій сфері проводили такі вчені, як Крейденко В. [8], Церковна А.В. [9], Рахімі А.М. [9], Михайличенко К.М. [10], Мошак Г.Г. [11] та інші.

З початком воєнних дій доля поставила новий виклик транспортній системі України та всім її громадянам. За цих обставин роль правового забезпечення роботи внутрішнього водного транспорту значно зросла. Це потребує проведення аналізу чинного українського законодавства в сфері регулювання роботи ВВТ з метою розробки пропозицій щодо його поступової адаптації до європейських стандартів та правових ініціатив.

#### **Формулювання мети дослідження**

Мета статті полягає в комплексному аналізі розвитку національного законодавства України у сфері внутрішнього водного транспорту, з акцентом на економічні, правові та організаційні аспекти. Дослідження також має на меті виявлення розбіжностей між національними та міжнародними правовими нормами, що регулюють цю сферу, а також розробку рекомендацій щодо гармонізації відповідного законодавства. Це дозволить підвищити ефективність національної транспортної системи, забезпечити її конкурентоспроможність та сприяти сталому розвитку галузі, враховуючи екологічні та соціальні вимоги.

#### **Викладення основного матеріалу дослідження**

Внутрішній водний транспорт (ВВТ) відіграє важливу роль у забезпеченні економічного розвитку будь-якої країни. Проте до прийняття Закону України «Про внутрішній водний транспорт» [12] ця сфера в нашій країні була абсолютно нерегульованою [8]. ВВТ мав досить негативний імідж, а річками перевозилось менше ніж 1 % всіх вантажів. Цей вид транспорту розглядався як пережиток минулих днів, який залишився у спадок від Радянського Союзу, і який досі складається зі старих суден, що мають високий рівень забруднювальних викидів та повільно перевозить недорогі вантажі. Тобто, річковий транспорт в Україні знаходиться фактично у занепаді. Портова інфраструктура українських річок також не відповідає сучасним вимогам. Більшість портів розташовані в центральних районах міст, що спричиняє руйнування міських доріг вантажівками, які прямують для завантаження/розвантаження у ці порти [8].

Прийняття у 2021 р. Закону України «Про внутрішній водний транспорт» [12] (далі – «Закону») стало важливим кроком для регулювання його роботи та передумовою інтеграції національної транспортної системи у транс'європейську мережу транспортних комунікацій. З прийняттям цього Закону з'явилися перспективи розвитку ВВТ і виведення його на сучасний рівень. Закон визначає правові, економічні та організаційні основи функціонування внутрішнього водного транспорту, а також взаємовідносини між суб'єктами, які беруть участь у цій сфері. Закон [12] складається з кількох розділів, які охоплюють широкий спектр питань, серед яких ключовими є наступні:

– Державне управління. Закон встановлює державне управління у сфері внутрішнього водного транспорту та визначає чітку структуру органів, що відповідають за регулювання внутрішнього водного транспорту, включаючи Міністерство інфраструктури України, яке координує діяльність у цій сфері.

– Експлуатація водних шляхів. Закон визначає правила експлуатації внутрішніх водних шляхів, їх класифікацію на судноплавні та несудноплавні, а також окреслює вимоги до їх використання.

– Правила судноплавства. Закон встановлює вимоги до суден, капітанів та інших учасників процесу, що забезпечують безпечне судноплавство.

– Безпека та охорона навколишнього середовища. Закон передбачає заходи щодо забезпечення безпеки судноплавства та охорони навколишнього середовища від негативного впливу внутрішнього водного транспорту.

– Митне регулювання. Закон окремо визначає питання митного та прикордонного регулювання для суден, які перетинають державний кордон України, що забезпечує контроль за переміщенням через кордон.

Незважаючи на позитивні аспекти Закону [12], питання щодо його ефективності та відповідності сучасним міжнародним стандартам залишаються актуальними. Для кращого розуміння того, як Закон [12] співвідноситься з міжнародною практикою, розглянемо кілька прикладів законодавства та міжнародних актів інших країн, що можуть слугувати орієнтиром для вдосконалення національної нормативної бази:

1) У США функціонування внутрішнього водного транспорту регулюється низкою федеральних законів, зокрема Законом США про внутрішні водні шляхи (Inland Waterways Act). Цей документ встановлює детальні правила використання водних шляхів, екологічної відповідальності та фінансування інфраструктурних проєктів. Американське законодавство також має чітку структуру фінансової підтримки та модернізації інфраструктури, що може слугувати прикладом для України.

2) В країнах ЄС регулювання внутрішнього водного транспорту базується на директивах та регламентах, які встановлюють єдині стандарти для всіх країн-членів. Наприклад, Директива 2006/87/ЄС визначає технічні вимоги до суден, що працюють на внутрішніх водних шляхах ЄС. Порівняно з Законом України «Про внутрішній водний транспорт» [12], європейське законодавство детальніше регулює технічні аспекти та екологічні стандарти. Закони країн, що входять до складу ЄС, зокрема, таких країн, як Німеччина та Нідерланди, приділяють значну увагу екологічним вимогам до суден та їх експлуатації на внутрішніх водних шляхах. В ЄС запроваджені суворі норми щодо викидів токсичних речовин суднами, управління відходами, мінімізації забруднення води тощо.

Крім того, в ЄС існують розвинені механізми державної підтримки для стимулювання використання внутрішнього водного транспорту як екологічно чистого виду транспорту, включаючи субсидії на модернізацію флоту та підтримку інфраструктури. У зв'язку з цим, Закон України «Про внутрішній водний транспорт» [12] містить загальні положення щодо охорони довкілля, але не має детально прописаних механізмів контролю та інструментів санкцій за порушення екологічних стандартів. Це створює екологічні ризики та стає перешкодою для гармонізації національного законодавства з європейськими стандартами [13].

Щодо державної підтримки ВВТ та стимулювання його розвитку, Закон України «Про внутрішній водний транспорт» [12] взагалі не передбачає таких механізмів або програм. Через відсутність достатнього рівня фінансової підтримки уряд змушений був екстрено надати субсидії на відновлення інфраструктури та запобігання негативним явищам на ринку судноплавства в Україні внаслідок пошкодження під час війни [14]. Крім того, Закон України «Про внутрішній водний транспорт» [12] не створює привабливих умов для залучення приватних інвесторів через надмірне бюрократичне навантаження і брак фінансування на розвиток водної інфраструктури [15].

3) Європейські країни мають конкретні та досить суворі вимоги щодо безпеки на внутрішньому водному транспорті. Вони охоплюють як технічні стандарти суден, так і вимоги до навчання та сертифікації екіпажу. У свою чергу, Закон України «Про внутрішній водний транспорт» [12] лише частково імплементує ці вимоги, що може призвести до виникнення небезпечних ситуацій та завдання збитків внаслідок недостатньої кваліфікації працівників галузі [16].

Законодавства окремих країн ЄС, зокрема Німеччини та Нідерландів, належним чином адаптовано до європейських норм і стандартів у сфері правового регулювання внутрішнього водного транспорту, але з урахуванням національних особливостей:

– законодавства Німеччини щодо внутрішнього водного транспорту є одним із найрозвиненіших у ЄС. Відповідний Федеральний Закон про судноплавство на внутрішніх водних шляхах (Binnenschiffahrtsgesetz – BinSchG) регулює всі аспекти, від технічних вимог до суден до питань екологічного захисту. Особлива увага приділяється питанням безпеки та інтеграції з іншими видами транспорту. Діяльність внутрішнього водного транспорту в Німеччині регулюється чіткими нормами (які включають зобов'язання судновласників, такі як використання сучасних екологічно безпечних суден, детальні вимоги до навчання персоналу) та вдається до кроків з цифрового розвитку сектору [17]. Порівняльний аналіз поняття «внутрішній водний шлях» у праві Німеччини та України показує наявність недостатньо обґрунтованих відмінностей, котрі негативно впливають на право внутрішнього судноплавства [11]. Зазначені дефініції впливають на визначення меж правового регулювання і, як наслідок, на частку перевезень, здійснюваних окремими видами транспорту. Обсяг поняття «внутрішній водний шлях» впливає на межу внутрішнього і морського судноплавства та відповідних частин права, а також на набір засобів юридичної техніки [11];

– Голландське законодавство передбачає значну роль держави у підтримці внутрішніх водних шляхів та розвитку їхньої інфраструктури. Особлива увага приділяється проєктам з модернізації каналів, шлюзів та мостів для підтримки безпеки та збереження економічного потенціалу водного транспорту. Важливу роль також відіграють інвестиції в розширення інфраструктури для збільшення пропускної здатності водних шляхів. Уряд Нідерландів активно заохочує приватні компанії вкладати кошти у модернізацію флоту та надає перевагу стартапам, що пропонують екологічно чисті рішення [18]. Таким чином, в Нідерландах законодавство передбачає чіткий розподіл обов'язків між державними органами та приватними операторами щодо утримання водних шляхів, шлюзів,

портів тощо. Закон України «Про внутрішній водний транспорт» [12] не визначає чіткої відповідальності за розвиток і модернізацію інфраструктури, а також механізмів фінансування, що створює проблеми для її ефективного розвитку. Слід зазначити, що система фінансування інфраструктури ВВТ, яка існує нині в Україні, не виправдовує себе, оскільки коштів на відновлення та розвиток відповідних інфраструктурних об'єктів катастрофічно не вистачає. Застарілість основних фондів ВВТ України, за даними Держстату, дорівнює 75,4 %, і обумовлена вона хронічним (протягом понад 20-річного періоду) недофінансуванням з боку держави [10]. Бюджетна програма «Підтримка експлуатаційно безпечного стану судноплавних шлюзів, внутрішніх водних шляхів» забезпечує лише близько 21 % нормативних витрат і взагалі не передбачає необхідних капітальних витрат; практично не ведуться роботи з підтримання габаритів водних шляхів; немає коштів на необхідні обсяги робіт з технічної і технологічної модернізації гідротехнічних споруд, впровадження сучасних інформаційних технологій забезпечення безпеки судноплавства [10].

Загалом, як демонструє проведений вище порівняльний аналіз, ключові недоліки Закону України «Про внутрішній водний транспорт» [12] полягають у відсутності чіткої системи фінансування, слабкому залученні інвестицій та недостатньому впровадженні екологічних вимог і стандартів безпеки. Це робить його менш ефективним у порівнянні з європейськими аналогами.

Таким чином, існує очевидна необхідність адаптації Закону України [12] до європейських стандартів та кращих світових практик. Це створить сприятливе нормативно-правове середовище, підвищить ефективність національної транспортної системи та її інтеграцію в глобальний транспортний простір. Окрім цього, підписавши Угоду про асоціацію з ЄС, Україна взяла на себе зобов'язання щодо розвитку внутрішнього водного транспорту (ВВТ), включаючи розробку стратегії розвитку річкового транспорту у співпраці з ЄС, інтеграцію річкового транспорту в мультимодальні перевезення та мережу пріоритетних транспортних маршрутів, а також імплементацію норм європейського права в національне законодавство [10]. Угода передбачає імплементацію Україною директив ЄС у сфері ВВТ з таких питань [10]:

- функціонування ринку перевезень (Директива Ради № 96/75/ЄС);
- доступ до професії (Директива Ради № 87/540/ЄЕС);
- безпека перевезень (Директива № 2006/87/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 12.12.2006 р., встановлює технічні вимоги до суден на внутрішніх водних шляхах);
- надання річкових інформаційних послуг (Директива № 2005/44/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 07.09.2005 р.);
- гармонізація умов отримання національних свідоцтв капітанів (Директива Ради № 96/50/ЄС) тощо [10].

Крім того, українське законодавство зробило певні кроки до приведення стандартів морського та річкового транспорту у відповідність до європейських норм. Серед ключових змін – впровадження директив щодо доступу до водного транспорту, взаємного визнання професійних кваліфікацій, технічних вимог до суден, а також реєстрація суден з унікальними європейськими номерами ENI. Закон «Про внутрішній водний транспорт» та ряд відповідних нормативно-правових актів імплементують ці директиви для інтеграції з європейською системою [16].

Попри позитивні сторони Закону України «Про внутрішній водний транспорт» [12] та реальні кроки у напрямку його адаптації до стандартів ЄС, деякі питання його ефективності та відповідності сучасним міжнародним стандартам залишаються актуальними. Закон уже двічі доповнювався з урахуванням сучасних вимог, але робота над його вдосконаленням триває. Пошук нових рішень ґрунтується на кількох ключових напрямках:

1. Можливість євроінтеграції. Закон у загальному є євроінтеграційним [13], оскільки імплементує положення п'яти директив ЄС щодо технічних вимог до суден внутрішнього плавання, визнання професійних кваліфікацій у внутрішньому судноплаванні, доступу до перевезень товарів, а також гармонізації річкових інформаційних послуг. Однак цей процес потребує подальшого вдосконалення правової бази та усунення розбіжностей між українськими та європейськими нормами, особливо в аспектах безпеки судноплавства та технічного нагляду за суднами.

2. Залучення приватного капіталу та інвестицій. Закон передбачає створення структури фінансового забезпечення для розвитку інфраструктури через залучення приватних інвесторів. Завдяки цьому можливо збільшення флоту та розвитку системи річкових терміналів. Однак чинні умови можуть не задовольняти підприємців, тому актуальним буде вдосконалення механізмів інвестування у будівництво суден, терміналів та мультимодальних логістичних центрів.

3. Економічний ефект. Розвиток ВВТ може суттєво зменшити навантаження на автомобільні дороги та залізниці, що призведе до зростання загального вантажообігу по країні. Це, у свою чергу, зменшить вартість транспортних послуг та підвищить конкурентоспроможність української економіки на світових ринках.

4. Екологічний аспект. Внутрішній водний транспорт менше впливає на екологію в порівнянні з автомобільним або залізничним транспортом. Зокрема, він вважається одним із найефективніших видів транспорту з точки зору зменшення викидів CO<sub>2</sub> на тонну вантажу. Однак його частка в ЄС залишається стабільною, на рівні близько 6 % від загального обсягу вантажних перевезень [9]. Тому при подальшому вдосконаленні Закону важливо

враховувати екологічні стандарти, що сприятимуть мінімізації впливу на навколишнє середовище під час транспортування вантажів [9].

Таким чином, очевидно, що вдосконалення законодавства сприятиме не лише кращій інтеграції національної транспортної системи з європейською, але й розвитку інфраструктури, підвищенню екологічних стандартів та ефективному використанню водного транспорту в економіці.

На сьогодні Україна прагне вибудувати тісні взаємозв'язки з ЄС, з можливістю майбутнього входження до його складу. У 2024 р. український уряд зосередився на виконанні рекомендацій Європейської комісії для просування переговорів про членство [19]. Тому, розглядаючи можливості покращення чинної законодавчої бази щодо внутрішнього водного транспорту (ВВТ), важливо враховувати відповідні закони, що діють в ЄС. Додатково, при формуванні стратегії рекомендуємо спиратися на план заходів [20], створений Національною радою з відновлення України від наслідків війни:

– Модернізація інфраструктури. Необхідно провести поглиблення та очищення акваторій портів, відбудову шлюзів та закупівлю новішого обладнання. Ці заходи дозволять суттєво підвищити пропускну спроможність водних шляхів. Уряд ЄС готовий інвестувати в ці проекти [21], за умов наявності відповідної законодавчої бази.

– Діджиталізація процесів. Важливо впровадити річкові інформаційні системи (RIS), які вже ефективно працюють у країнах ЄС. Вони дозволяють відстежувати судна в реальному часі та автоматизувати навігаційні процеси, що покращує безпеку судноплавства та знижує витрати [22].

– Введення екологічних норм. Україні необхідно запровадити власні екологічні стандарти, включаючи суворі санкції за їх порушення. Це включає встановлення допустимого рівня забруднення середовища та викидів токсичних речовин суднами та підприємствами, що сприятиме зниженню рівня забруднення і поліпшенню екологічного середовища [23].

– Система фінансових стимулів. Варто розробити механізми фінансових стимулів для розвитку підприємницької діяльності, що включають заохочення до модернізації суден і залучення капіталовкладень у сферу перевезень ВВТ. Це дозволить створити повноцінну систему внутрішніх водних сполучень, здатну самостійно задовольняти потреби з ремонту та підтримання у робочому стані [24].

Крім того, враховуючи Угоду про асоціацію з ЄС, нове законодавство повинно відповідати чинним критеріям ЄС. Однією з головних цілей України є гармонізація свого законодавства з європейським, що дозволить інтегрувати внутрішній водний транспорт у загальноєвропейську транспортну систему. Це включає технічні стандарти, правила безпеки та екологічні вимоги.

Отже, для підвищення ефективності законодавства України про внутрішній водний транспорт важливо звернути увагу на гармонізацію з європейськими стандартами, з особливим акцентом на екологічні питання, безпеку та державну підтримку.

### Висновки

1. В Україні все гостріше постає питання перевезення вантажів внутрішнім водним транспортом (ВВТ). В умовах військового стану, коли морська акваторія є небезпечною, а автомобільні та залізничні шляхи не здатні обробити весь вантажопотік, ВВТ має шанс стати важливим видом транспорту для бізнесу.

2. Відсутність сучасного законодавства, яке відповідає європейським аналогам, стримує розвиток ВВТ. Невизначеність правового статусу річкових портів, терміналів і земель, а також непрозорі застосування норм морського права до річкового транспорту знижують інвестиційну привабливість і гальмують ринок річкових перевезень.

3. Зв'язок між пріоритетами євроінтеграційного курсу України у сфері ВВТ і основними напрямками політики Європейського Союзу має бути чітко відображений у законодавчих ініціативах. Необхідно ретельно враховувати директиви ЄС у водному транспорті та імплементувати їх у національне законодавство згідно з Угодою про асоціацію між Україною та ЄС.

4. Якнайшвидше доопрацювання закону України про внутрішній водний транспорт дозволить суттєво підвищити ефективність річкового судноплавства, сприятиме інтеграції національної транспортної системи до європейського простору та позитивно вплине на екологічну ситуацію в країні.

### Список використаної літератури

1. European Green Deal. European Commission. URL: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en) (дата звернення: 23.09.2024).
2. Trans-European Transport Network, TEN-T. Regulation (1315/2013/EU). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32013R1315> (дата звернення: 23.09.2024).
3. A fundamental transport transformation: Commission presents its plan for green, smart and affordable mobility. URL: [https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/mobility-strategy\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/mobility-strategy_en) (дата звернення: 23.09.2024).



4. Kyryllova O., Kyryllova V., Mahamadov O. & Romakh V. (2024). Smart port: the latest technologies and international experience in their implementation. *Transport Development*. 2(21). 62-74. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.2-21.06> (дата звернення: 23.09.2024).

5. Кириллова В.Ю., Кириллова О.В., Магамадов О.Р. (2024). Поняття «Smart Port» у контексті глобальних тенденцій інтеграції інтелектуальних транспортних та інформаційних технологій у портовій індустрії. *Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки»*. 35(74). 5. ISSN 2663-5941 (Print). ISSN 2663-595X (Online). URL: <http://www.tech.vernadskyyjournals.in.ua/archive> (дата звернення: 23.09.2024).

6. Кириллова В.Ю., Кириллова О.В. (2024). Мультиmodalні перевезення у національному законодавстві та міжнародному контексті. *Transport Development*. 3(22). URL: <https://journals.onmu.in.ua/index.php/journal/issue/archive> (дата звернення: 23.09.2024).

7. Motorways of the Sea. URL: [https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/maritime/motorways-sea\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/maritime/motorways-sea_en) (дата звернення: 23.09.2024).

8. Крейденко В. Переваги та недоліки нового законодавства про водний транспорт. *Економічна правда*. 8 січня 2021. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2021/01/8/669805/> (дата звернення: 05.09.2024).

9. Церковна А.В., Рахімі А.М. Внутрішній водний транспорт України: проблеми та перспективи. *Ринкова економіка: сучасна теорія і практика управління*. 2023. № 21(3(52)). С. 504–528. DOI: [https://doi.org/10.18524/2413-9998.2022.3\(52\).275828](https://doi.org/10.18524/2413-9998.2022.3(52).275828) (дата звернення: 05.09.2024).

10. Михайличенко К. М. Щодо ключових положень законопроекту «Про внутрішній водний транспорт» в контексті реформування економіки України. *Economic Annals-XXI*. 2015. 9-10. С. 36-40. URL: <https://ea21journal.world/wp-content/uploads/2022/06/ea-V154-08.pdf> (дата звернення: 05.09.2024).

11. Мошак Г. Г., Іванова О. М. Правове регулювання внутрішніх водних шляхів в Україні та Німеччині. *Право та інновації*. 2022. № 4 (40). С. 93–99. DOI: [https://doi.org/10.37772/2518-1718-2022-4\(40\)-12](https://doi.org/10.37772/2518-1718-2022-4(40)-12) (дата звернення: 05.09.2024).

12. Про внутрішній водний транспорт : Закон України від 03.12.2020 № 1054-IX : станом на 28.05.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/1054-20#Text> (дата звернення: 05.09.2024).

13. Закон «Про внутрішній водний транспорт»: що зміниться з нового року. *Міністерство інфраструктури України (MTU)*. 30 Грудня 2021. URL: <https://mtu.gov.ua/news/33348.html> (дата звернення: 05.09.2024).

14. Міністерство інфраструктури забезпечуватиме покриття ризиків для судноплавних та залізничних перевізників. *Міністерство інфраструктури України (MTU)*. 7 Червня 2022. URL: <https://mtu.gov.ua/news/33558.html> (дата звернення: 05.09.2024).

15. (Документ) Стратегія розвитку внутрішнього водного транспорту України на період до 2031 року. *Морські бізнес-новини України*. 20.09.2021. URL: <https://maritimebusinessnews.com.ua/2021/09/20/223491/> (дата звернення: 05.09.2024).

16. Прийняття нормативно-правових актів у сферах морського і внутрішнього водного транспорту та судноплавства з метою адаптації законодавства України до законодавства Європейського Союзу. *Державна служба морського і внутрішнього водного транспорту та судноплавства України*. 09 червня 2023. URL: <https://marad.gov.ua/ua/diyalnist/mizhnarodna-diyalnist/yevrointegraciya/prijnyattya-npa-u-sferi-morskogo-ta-richkovogo-transportu> (дата звернення: 05.09.2024).

17. Schlüsselinitiativen zur ökologischen Stabilität des internen Wassertransports in Deutschland. *BMZ strategie*. 2017. 08. URL: <https://www.bmz.de/resource/blob/23546/strategiepapier404-06-2017.pdf> (date of access: 05.09.2024).

18. Inland Shipping. *Government of the Netherlands*. URL: <https://www.government.nl/topics/freight-transportation/inland-shipping> (date of access: 05.09.2024).

19. Україна 2024: шлях до ЄС, реформи й ключові пріоритети. *Ренімаційний Пакет Реформ*. 22.02.2024. URL: <https://rpr.org.ua/news/ukraina-2024-shliakh-do-yes-reformy-y-kliuchovi-priorytety/> (дата звернення: 05.09.2024).

20. Проект Плану відновлення України. Матеріали робочої групи «Відновлення та розбудова інфраструктури». *Кабінет Міністрів України*. Липень 2022. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/restoration-and-development-of-infrastructure.pdf> (дата звернення: 05.09.2024).

21. Inland waterways. *European Commission*. URL: [https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/inland-waterways\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/inland-waterways_en) (date of access: 05.09.2024).

22. Consolidated text: Directive 2005/44/EC of the European Parliament and of the Council of 7 September 2005 on harmonised river information services (RIS) on inland waterways in the Community. *EUR-Lex*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2005/44/2019-07-26> (date of access: 05.09.2024).

23. Air. *European Commission*. URL: [https://ec.europa.eu/environment/air/transport/non\\_road.html](https://ec.europa.eu/environment/air/transport/non_road.html) (date of access: 05.09.2024).

24. NAIADES II. *European Commission*. URL: [https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/inland-waterways/promotion-inland-waterway-transport/naiades-ii\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/inland-waterways/promotion-inland-waterway-transport/naiades-ii_en) (date of access: 05.09.2024).

## References

1. European Green Deal. URL: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en)
2. Trans-European Transport Network, TEN-T. Regulation (1315/2013/EU). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32013R1315>
3. A fundamental transport transformation: Commission presents its plan for green, smart and affordable mobility. URL: [https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/mobility-strategy\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/mobility-strategy_en)
4. Kyryllova O., Kyryllova V., Mahamadov O. & Romakh V. (2024) Smart port: the latest technologies and international experience in their implementation. *Transport Development*. 2(21). 62-74. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.2-21.06> [in Ukrainian].
5. Kyryllova V.U., Kyryllova O.V. & Mahamadov O.R. (2024) Poniattia «Smart Port» u konteksti hlobalnykh tendentsii intehratsii intelektualnykh transportnykh ta informatsiinykh tekhnolohii u portovii industrii. [The concept of «Smart Port» in the context of global trends in the integration of intelligent transport and information technologies in the port industry.] *Naukovyi zhurnal «Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriia: Tekhnichni nauky»*. 35(74). 5. ISSN 2663-5941 (Print). ISSN 2663-595X (Online). URL: <http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/archive> [in Ukrainian].
6. Kyryllova V.U. & Kyryllova O.V. (2024) Multymodalni perevezennia u natsionalnomu zakonodavstvi ta mizhnarodnomu konteksti. [Multimodal transport in national legislation and international context] *Transport Development*. 3(22). URL: <https://journals.onmu.in.ua/index.php/journal/issue/archive> [in Ukrainian].
7. Motorways of the Sea. URL: [https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/maritime/motorways-sea\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/maritime/motorways-sea_en)
8. Kreidenko V. (2021) Perevahy ta nedoliky novogo zakonodavstva pro vodnyi transport. [Advantages and disadvantages of the new legislation on water transport] *Ekonomichna pravda*. 8 sichnia. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2021/01/8/669805/> [in Ukrainian].
9. Tserkovna A. & Rahimi A. (2023) Inland water transport of Ukraine: Problems and prospects. *Market economy: modern management theory and practice*. 21. 498-522. DOI: [https://doi.org/10.18524/2413-9998.2022.3\(52\).275828](https://doi.org/10.18524/2413-9998.2022.3(52).275828)
10. Mikhailichenko K.M. (2015) Shchodo kluchovykh polozhen zakonoproektu «Pro vnutrishnii vodnyi transport» v konteksti reformuvannia ekonomiky Ukrainy. [Key provisions of the bill «On inland waterway transport» in the context of economic reforms of Ukraine]. *Economic Annals-XXI*, 9-10, p. 36-40. URL: <https://ea21journal.world/wp-content/uploads/2022/06/ea-V154-08.pdf> [in Ukrainian].
11. Moshak H.H. & Ivanova O.M. (2022) Legal status of inland waterways in Ukraine and Germany. *Pravo ta innovatsii*, 4 (40), p. 93–99. DOI: [https://doi.org/10.37772/2518-1718-2022-4\(40\)-12](https://doi.org/10.37772/2518-1718-2022-4(40)-12)
12. Pro vnutrishnii vodnyi transport: Zakon Ukrainy vid 03.12.2020 № 1054-IX: stanom na 28.05.2024. [On Inland Water Transport: Law of Ukraine dated 03.12.2020 No. 1054-IX: as of 28.05.2024] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/1054-20#Text> [in Ukrainian].
13. Zakon «Pro vnutrishnii vodnyi transport»: shcho zminytsia z novogo roku. [The Law «On Inland Water Transport»: what will change from the new year] *Ministerstvo infrastruktury Ukrainy (MIU)*. 30 Hrudnia. URL: <https://mtu.gov.ua/news/33348.html> [in Ukrainian].
14. Ministerstvo infrastruktury zabezpechuvatyme pokryttia ryzykiv dlia sudnoplavnykh ta zaliznychnykh pereviznykiv. [The Ministry of Infrastructure will provide risk coverage for shipping and rail carriers]. *Ministerstvo infrastruktury Ukrainy (MIU)*. 7 Chervnia 2022. URL: <https://mtu.gov.ua/news/33558.html> [in Ukrainian].
15. (Dokument) Stratehiia rozvytku vnutrishnoho vodnoho transportu Ukrainy na period do 2031 roku. [(Document) Strategy for the development of inland water transport of Ukraine for the period until 2031] *Morski biznes-novyny Ukrainy*. 20.09.2021. URL: <https://maritimebusinessnews.com.ua/2021/09/20/223491/> [in Ukrainian].
16. Pryiniattia normatyvno-pravovykh aktiv u sferakh morskoho i vnutrishnoho vodnoho transportu ta sudnoplavstva z metoiu adaptatsii zakonodavstva Ukrainy do zakonodavstva Yevropeiskoho Soiuzu. [Adoption of normative legal acts in the spheres of sea and inland water transport and shipping for the purpose of adapting the legislation of Ukraine to the legislation of the European Union]. *Derzhavna sluzhba morskoho i vnutrishnoho vodnoho transportu ta sudnoplavstva Ukrainy*. 09 chervnia 2023. URL: <https://marad.gov.ua/ua/diyalnist/mizhnarodna-diyalnist/jevrointegraciya/prijnyattya-mpa-u-sferi-morskogo-ta-richkovogo-transportu> [in Ukrainian].
17. Schlüsselinitiativen zur ökologischen Stabilität des internen Wassertransports in Deutschland. *BMZ strategie*. 2017. 08. URL: <https://www.bmz.de/resource/blob/23546/strategiepapier404-06-2017.pdf>
18. Inland Shipping. *Government of the Netherlands*. URL: <https://www.government.nl/topics/freight-transportation/inland-shipment>
19. Ukraina 2024: shliakh do YeS, reformy y kluchovi priorytety. [Ukraine 2024: the path to the EU, reforms and key priorities]. *Reanimatsiyni Paket Reform*. 22.02.2024. URL: <https://rpr.org.ua/news/ukraina-2024-shliakh-do-yes-reformy-y-kluchovi-priorytety/> [in Ukrainian].
20. Proekt Planu vidnovlennia Ukrainy. Materialy robochoi hrupy «Vidnovlennia ta rozbudova infrastruktury». [Project of the Recovery Plan of Ukraine. Materials of the working group «Restoration and development of infrastructure»].

*Kabinet Ministriv Ukrainy*. Lypen 2022. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/restoration-and-development-of-infrastructure.pdf> [in Ukrainian].

21. Inland waterways. European Commission. URL: [https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/inland-waterways\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/inland-waterways_en)

22. Consolidated text: Directive 2005/44/EC of the European Parliament and of the Council of 7 September 2005 on harmonised river information services (RIS) on inland waterways in the Community. *EUR-Lex*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2005/44/2019-07-26>

23. Air. *European Commission*. URL: [https://ec.europa.eu/environment/air/transport/non\\_road.html](https://ec.europa.eu/environment/air/transport/non_road.html)

24. NAIADES II. *European Commission*. URL: [https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/inland-waterways/promotion-inland-waterway-transport/naiades-ii\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/inland-waterways/promotion-inland-waterway-transport/naiades-ii_en)

**П. В. ЛУБ'ЯНИЙ**

кандидат технічних наук, доцент,  
завідувач кафедри транспортних систем  
та технічного сервісу  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0003-2668-5063

**О. А. ВОЙТОВИЧ**

кандидат технічних наук, доцент,  
декан факультету інженерії та транспорту  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0003-0510-4362

**В. М. МОСЬПАН**

кандидат технічних наук,  
доцент кафедри транспортних систем  
та технічного сервісу  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0009-0004-7880-1884

**Н. В. МОСЬПАН**

кандидат технічних наук,  
консультант у галузі транспортних технологій  
Представництво «Дорнієр Консалтинг Інтернешенал ГмБХ»  
ORCID: 0009-0001-8713-8445

## УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

*Підвищення якості транспортного обслуговування є ключовим чинником успіху транспортних підприємств в умовах конкурентного ринку. Якість транспортних послуг впливає на здатність підприємства задовольняти потреби клієнтів у мобільності, що у свою чергу, визначає їх вибір того чи іншого перевізника.*

*Основні показники якості транспортного обслуговування охоплюють такі параметри, як своєчасність доставки, збереження вантажів, безпека перевезень, регулярність руху, екологічність транспортування, тощо. Для пасажирських перевезень ключовими є також комфортабельність транспорту, доступність цін та зручність розкладу, що безпосередньо впливає на рівень задоволеності клієнтів.*

*Комплексний підхід до оцінки якості транспортних послуг має враховувати всі зазначені показники у сукупності. Одним із важливих аспектів є баланс між підвищенням якості обслуговування та витратами, необхідними для реалізації покращень. Транспортні підприємства повинні шукати оптимальні рішення, що дозволяють поліпшити якість послуг без значного підвищення витрат, з урахуванням очікуваних економічних результатів.*

*Важливим етапом у процесі покращення якості транспортного обслуговування є проведення маркетингових досліджень та опитувань споживачів. Це дозволяє виявляти конкретні проблеми та слабкі місця в наданні послуг. Порівняння власних показників якості з нормативами та результатами конкурентів дає змогу оцінити свої позиції на ринку і прийняти рішення щодо подальшого розвитку.*

*Інноваційні технології також відіграють важливу роль у підвищенні якості транспортного обслуговування. Автоматизація процесів, впровадження сучасних інформаційних систем для моніторингу та управління транспортними потоками дозволяють оптимізувати роботу і зменшити витрати, одночасно підвищуючи ефективність і задоволеність клієнтів. Використання GPS-навігації, онлайн-систем для відстеження переміщення вантажів і маршрутів дозволяє підвищити точність і прозорість транспортних операцій.*

*Екологічні аспекти також стають все більш важливими в контексті надання якісних транспортних послуг. Використання екологічно чистих транспортних засобів, впровадження альтернативних джерел енергії та скорочення викидів шкідливих речовин у атмосферу сприяє підвищенню репутації компаній на ринку та зміцненню їх позицій серед клієнтів, які приділяють увагу питанням екології.*

**Ключові слова:** управління, транспорт, обслуговування, конкуренція, якість.

P. V. LUBYANYI

Ph.D. (Engineering Sciences), Associate Professor,  
Head of the Department of Transport Systems  
and Technical Service  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0003-2668-5063

O. A. VOYTOVICH

Ph.D. (Engineering Sciences), Associate Professor,  
Dean of the Faculty of Engineering and Transport  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0003-0510-4362

V. M. MOSPAN

Ph.D. (Engineering Sciences),  
Associate Professor at the Department of Transport Systems  
and Technical Service  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0009-0004-7880-1884

N. V. MOSPAN

Ph.D. (Engineering Sciences),  
Transport Technologies Consultant  
Representative Office "Dornier Consulting International GmbH"  
ORCID: 0009-0001-8713-8445

## QUALITY MANAGEMENT OF TRANSPORT SERVICES

*Improving the quality of transport services is a key success factor for transport companies in a competitive market. The quality of transport services affects the company's ability to meet customers' mobility needs, which in turn influences their choice of carrier.*

*The main indicators of transport service quality include parameters such as timely delivery, cargo safety, transportation security, service regularity, environmental friendliness, and more. For public transport, key factors also include the comfort of the vehicles, affordability of fares, and convenience of schedules, all of which directly impact customer satisfaction.*

*A comprehensive approach to assessing the quality of transport services should take into account all these indicators as a whole. One important aspect is finding a balance between improving service quality and the costs required to implement improvements. Transport companies must seek optimal solutions that enhance service quality without significantly increasing costs, taking into account expected economic outcomes.*

*An important stage in the process of improving transport service quality is conducting market research and consumer surveys. This helps identify specific problems and weak points in service delivery. Comparing own quality indicators with standards and competitor results enables companies to assess their market position and make decisions on further development.*

*Innovative technologies also play a crucial role in improving transport service quality. Automating processes, implementing modern information systems for monitoring and managing transport flows helps optimize operations and reduce costs while increasing efficiency and customer satisfaction. The use of GPS navigation, online systems for tracking cargo movement and routes enhances the accuracy and transparency of transport operations.*

*Environmental aspects are also becoming increasingly important in the context of providing quality transport services. The use of environmentally friendly vehicles, the introduction of alternative energy sources, and the reduction of harmful emissions into the atmosphere help improve a company's reputation in the market and strengthen its position among customers who prioritize environmental concerns.*

**Key words:** *management, transport, service, competition, quality.*

### Постановка проблеми

В умовах ринкових відносин та конкуренції на транспортному ринку суттєво зростає вплив рівня якості транспортного обслуговування користувачів на успішну діяльність того чи іншого виду транспорту. Якість транспортної послуги – це сукупність властивостей і ознак, що характеризують її призначення, особливості, корисність і здатність задовольняти певні потреби користувачів у пересуванні.

Оскільки перевезення є однією з важливих потреб життєдіяльності людини, то при виборі факторів «якість-ціна» якість транспортного обслуговування здебільшого виходить на перше місце. Тому перед представникам маркетингових відділів транспортних підприємств під час аналізу його ринкових можливостей дуже важливо знати споживчу оцінку якості транспортної послуги свого підприємства. Розробка транспортної послуги на рівні

задуму, реального виконання та підкріплення вимагає від працівників транспортних підприємств ретельного вивчення своїх клієнтів, щоб краще зрозуміти всі особливості їх запитів щодо отримання транспортних послуг. При цьому також важливо знати можливості конкурентів з надання транспортних послуг.

Таким чином у сучасних умовах, щоб досягти успіху транспортні підприємства повинні розробляти гнучку маркетингову систему управління якістю транспортного обслуговування, правильно оцінювати ці заходи їх вплив на кінцевий результат діяльності з урахуванням конкурентної обстановки на транспортному ринку.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Питання якості транспортного обслуговування досліджується багатьма вітчизняними та закордонними науковцями. Суттєвий вклад у вивчення даного питання здійснено П. Горбачовим, І. Дмитрієвим, Є. Нагорним, Н. Шраменко, І. Москвиченко, В. Стадником, О. Ложачевською, Н. Олійником, А. Ghobadian, S. Speller, M. Jones, C. Tapiero, K. Kogan, P. Panayides, I. Meidutė-Kavaliauskienė, A. Aranskis, M. Litvinenko, та ін.

Результати проведеного аналізу підходів до оцінки якості транспортного обслуговування свідчать про можливість їх удосконалення за рахунок комплексного врахування різних параметрів надання транспортних послуг.

#### **Формулювання мети дослідження**

Метою дослідження є формалізація залежностей, використання яких дозволить транспортним підприємствам здійснювати комплексну оцінку якості обслуговування клієнтів з урахування таких параметрів як дотримання встановлених термінів доставки, збереження вантажів, гарантована ритмічність та регулярність перевезень, рівень задоволення попиту, комплексність, безпечність та екологічність транспортного обслуговування.

#### **Викладення основного матеріалу дослідження**

Першочерговим завданням, що постає при удосконаленні системи управління транспортним обслуговуванням є встановлення основних показників його якості, що визначають характерні властивості та ознаки транспортної продукції. Показники якості транспортного обслуговування мають певні відмінності для вантажних та пасажирських перевезень.

Для характеристики вантажних перевезень основними показниками якості транспортного обслуговування вантажовласників є:

- швидкість та строки доставки вантажів;
- збереження вантажів, що перевозяться;
- регулярність і своєчасність чи ритмічність та рівномірність перевезень;
- комплексність та повнота транспортного обслуговування;
- безпека руху транспорту;
- екологічність перевезень.

До показників якості транспортного обслуговування пасажирів відносять:

- безпеку поїздок пасажирів;
- комфортабельність, комплексність та культуру транспортного обслуговування в дорозі та в пунктах відправлення, пересадки та прибуття;
- швидкість пасажирських перевезень;
- регулярність перевезень та зручність розклад руху транспортних засобів.

До показників якості транспортного обслуговування вантажовласників та пасажирів можна віднести також транспортну забезпеченість території та пов'язану з розміщенням шляхів сполучення транспортну доступність споживачів транспортних послуг.

Слід підкреслити, що наведені показники є натуральними вимірниками якості транспортного обслуговування, а їх достатність чи необхідний рівень на конкурентних умовах може бути встановлений тільки шляхом зіставлення з певними нормативами якості, плановими показниками або з аналогічними показниками у конкурентів, або інших країнах. Наприклад, термін доставки вантажу за 6 діб при середньодобовій відстані доставки 550 км без порівняння з оптимальними нормативами терміну та швидкості доставки в конкретних умовах мало що говорять про якість перевезень. У зв'язку з цим можна зазначити, що рівень якості є відносним поняттям. Тому при аналізі якісних показників необхідно визначити не лише їхню абсолютну величину, але, передусім, їх відносний рівень, тобто рівень виконання термінів доставки, збереження вантажів, регулярності та безпеки перевезень, комплексності обслуговування тощо [1]. Необхідно також відзначити, що низку показників якості чисельно визначити дуже складно або неможливо через відсутність статистичного обліку (наприклад, комплексність, комфортабельність або культуру транспортного обслуговування). У таких ситуаціях представники маркетингових відділів транспортних підприємств можуть запропонувати оцінити якість транспортного обслуговування шляхом проведення обстежень перевезень, анкетних опитувань, спостережень, інтерв'ю серед споживачів транспортних послуг.

Слід також враховувати, що середні показники якості транспортного обслуговування мають умовний характер, як і будь-яка середня. Той факт, що одному клієнту вантаж доставлений значно швидше за встановлену норму, не компенсує втрат, які зазнає інший клієнт, який отримав вантаж з перевищенням часу доставки. Хоча

загальний середній рівень виконання замовлень транспортного підприємства за певний період (наприклад, за рік) може бути високим.

Рівень виконання встановлених термінів доставки вантажів  $K_{\text{тд}}$  визначається за наступною формулою:

$$K_{\text{тд}} = \sum P_{\phi} / P_3, \text{ або } t_{\text{д}}^{\text{н}} / t_{\text{д}}^{\phi} \text{ при } t_{\text{д}}^{\phi} \triangleright t_{\text{д}}^{\text{н}}, \quad (1)$$

де  $\sum P_{\phi}$  – фактичний обсяг перевезень вантажів, доставлених одержувачам вантажу з дотриманням встановлених нормативних термінів доставки за певний період часу  $t$ , т;

$\sum P_3$  – загальний обсяг перевезень аналізованих вантажів за той же період часу  $t$ , т;

$t_{\text{д}}^{\text{н}}, t_{\text{д}}^{\phi}$  – середні нормативний та фактичний термін доставки вантажів за певний період часу, діб.

Нормативні терміни доставки встановлюються, виходячи з технічних умов роботи рухомого складу, схем транспортування, дальності перевезення та технологічних норм виконання вантажних та інших операцій, пов'язаних із доставкою конкретного вантажу [2, 3].

Для різних вантажів встановлюються різні нормативи термінів доставки. Для термінових і швидкокопсувних вантажів ці норми зазвичай менші, ніж для вантажів регулярної доставки (вугілля, руди, металів та інших). За дотримання термінів доставки матеріальну відповідальність несе перевізник у вигляді штрафу, що розраховується як певний відсоток від вартості вантажу за кожен добу прострочення.

Рівень збереження вантажів ( $K_{\text{зв}}$ ) можна визначити за формулою:

$$K_{\text{зв}} = \sum P_o - \sum P_{\text{вт}} (1 - \phi_{\text{н}} / 100) / \sum P_o, \quad (2)$$

де  $\sum P_{\text{вт}}$  – обсяг втрат вантажів, що перевозяться, за період  $t$ , т;

$\phi_{\text{н}}$  – середня норма природного зменшення вантажу, що перевозиться, %.

Для різних вантажів норма природних втрат (усушка, утруска і т.п.) різна. Для цегли вона становить 1,3 %, а фактичні втрати сягають у середньому 7 %; для цементу – 1,2 і 4 %; вугілля – 1,5 і 5 %; залізняка – 0,9 і 3 % відповідно.

Рівень гарантованої ритмічності та регулярності перевезень ( $K_{\text{гр}}$ ) визначається за наступною формулою:

$$K_{\text{гр}} = n_{\text{н}}^t / n_{\text{о}}^t, \text{ або } K_{\text{гр}} = \sum P_{\text{гр}} / \sum P_3, \quad (3)$$

де  $n_{\text{н}}^t, \sum P_{\text{гр}}$  – кількість поставок продукції або обсяг перевезень вантажів відповідно, доставлених з дотриманням нормативного інтервалу за період  $t$ , од. або т;

$n_{\text{о}}^t, \sum P_3$  – загальна кількість поставок продукції або обсягу перевезень за той же період видом транспорту, що розглядається, од. або т;

Цей показник можна розрахувати також за рівнем нерівномірності перевезень протягом року як відношення максимального місячного обсягу перевезень на середньомісячну величину перевезень вантажу. Враховуючи, що нерівномірність перевезень значною мірою залежить від сезонності виробництва та споживання деякої продукції (наприклад, цукрових буряків, овочів) для розрахунків слід приймати коротші періоди (сезони) перевезень.

Рівень комплексності обслуговування вантажовласників ( $K_{\text{ком}}$ ) можна визначити за формулою:

$$K_{\text{ком}} = \sum P_{\text{ком}} \alpha_{\text{ком}} / P_3, \quad (4)$$

де  $\sum P_{\text{ком}}$  – обсяг комплексних перевезень вантажів «від дверей складу відправника до дверей складу одержувача» під'їзною залізничною колією або автотранспортом;

$\alpha_{\text{ком}}$  – поправочний коефіцієнт, що враховує рівень комплексності доставки вантажів на початку та наприкінці маршруту перевезення.

Коефіцієнт комплексності визначається експертно з урахуванням маркетингових обстежень. Цей показник для загальних розрахунків орієнтовно може бути прийнятий на рівні 0,8.

Рівень задоволення попиту ( $K_{\text{зн}}$ ) може бути визначена за наступною формулою:

$$K_{\text{зн}} = 1 - \sum P_{\text{нев}} / P_3, \quad (5)$$

де  $\sum P_{\text{нев}}$  – обсяг невивезених транспортним оператором вантажів за певний період  $t$ , т.е.

Рівень безпеки перевезень ( $K_{\text{бп}}$ ) можна розрахувати наступним чином:

$$K_{\text{бп}} = B_{\text{н}} / (B_{\text{ф}} \phi_{\text{б}}), \quad (6)$$

де  $B_{\text{н}}$  – норматив безпеки руху транспортних засобів, що приймається величиною в діапазоні від 0,95 до 1,0 (зазвичай, для залізниць 1,0; морського транспорту – 0,98; автотранспорту – 0,95);

$B_{\text{ф}}$  – фактичний рівень безпеки перевезень, який визначається відносною кількістю аварій і катастроф на транспорті, що припадає на 1 млн. т-км;

$\phi_{\text{б}}$  – поправочний коефіцієнт, що враховує тяжкість окремих порушень безпеки, що спричинили людські жертви та велику матеріальну шкоду ( $\phi_{\text{б}} \geq 1$ ).

Рівень екологічності транспортного обслуговування ( $K_{ек}$ ) можна визначити за формулою:

$$K_{ек} = V_n / V_{\phi}, \text{ при } V_n < V_{\phi}, \tag{7}$$

де  $V_n$  – нормативна величина гранично допустимої концентрації (ГДК) шкідливих речовин або шкоди для довкілля від роботи транспорту, що визначається технічними нормами та технологічними інструкціями;

$V_{\phi}$  – фактична питома величина шкоди навколишнього середовища від роботи транспорту під час вантажних перевезень, що визначається за спеціальною методикою з урахуванням витрат на природоохоронні заходи.

Аналогічним чином можуть бути визначені показники якості транспортного обслуговування пасажирів.

Для управління якістю обслуговування транспортним підприємствам важливо встановити загальний середній рівень якості ( $K_{ог}$ ) за сукупністю всіх показників як зазначено у формулі нижче.

$$K_{ог} = \sum K_i \alpha_i, \tag{8}$$

де  $K_i$  – рівень конкретного  $i$ -го показника якості транспортного обслуговування;

$\alpha_i$  – питома вага  $i$ -го показника в загальній оцінці якості, що визначається як рейтинг переваг клієнтів, або розрахунковим шляхом за рівнем економічної ефективності окремих заходів щодо підвищення якості транспортного обслуговування у загальному ефекті від усіх таких заходів, що приймається за 1 або 100 %.

Комплексний показник якості транспортного обслуговування знаходиться в межах від 0 до 1 або у відсотках від 0 до 100. Нульовий рівень буде за відсутності виконання замовлення з надання транспортної послуги. При комплексному стратегічному маркетинговому дослідженні цей показник включає всі вимірники по так званому «колесу якості» (рис. 1), зокрема рівень транспортної забезпеченості та доступності.

Як видно із рис. 1, протилежність інтересів клієнтів щодо рівня якості транспортного обслуговування та транспортних підприємств щодо витрат на забезпечення якості транспортного обслуговування певною мірою є «двигуном» цього «колеса».



Рис. 1. Комплексне «колесо якості» транспортного обслуговування

Водночас оцінка якості транспортної продукції для клієнтів та транспортних підприємств має бути інтегрованою. З іншого боку, очевидно, що з погляду комплексності відсутність чи погіршення хоча одного з показників якості призведе до порушення руху «колеса». Це буде причиною зниження загального рівня конкурентоспроможності продукції транспортного підприємства і погіршення його фінансово-економічного становища. Таким чином, описаний підхід до аналізу рівня якості транспортного обслуговування наочно свідчить про можливість системного підходу до визначення показників якості.

Комплексний показник якості може бути розрахований як за окремими видами перевезень та видами транспорту, родами вантажів та регіонами країни, так і загалом транспортним комплексом.

Така натуральна оцінка якості транспортного обслуговування має велике практичне значення, так як враховує інтереси клієнта та відображає актуальний рівень якості транспортних послуг, що надає підприємство [4]. Це дозволяє розробляти стратегію підвищення якості обслуговування споживачів транспортних послуг для завоювання нових ніш транспортного ринку і збільшення обсягів перевезень. Однак реальне вирішення цієї проблеми



неможливе без порівняння з витратами на здійснення таких заходів. Для цього необхідне визначення економічної ефективності заходів щодо підвищення рівня якості транспортного обслуговування споживачів транспортних послуг. Рівень доцільного підвищення якості може бути встановлено лише з урахуванням розрахунку додаткового ефекту, тобто приросту прибутку, який отримує транспортне підприємство внаслідок покращення якості обслуговування клієнтів за рахунок зростання обсягів перевезень та (або) підвищення плати за якісні транспортні послуги протягом певного періоду часу.

Як показує практика, більшість заходів щодо підвищення якості транспортного обслуговування потребують певних (додаткових) витрат ( $\Delta B_j$ ). Тому розрахунок оптимального рівня якості обслуговування ( $Y_o^{opt}$ ) може бути здійснений шляхом порівняння цих витрат з можливим отриманням додаткових доходів ( $\Delta D_j$ ) та прибутку за наведеним на рис. 2 схемою.

Перпендикуляр, опущений з найвищої точки кривої максимального доходу на горизонтальну вісь коефіцієнтів якості, у своїй основі покаже можливий оптимальний рівень показників якості транспортного обслуговування клієнтури. Такі розрахунки можуть бути виконані за кожним із показників якості.

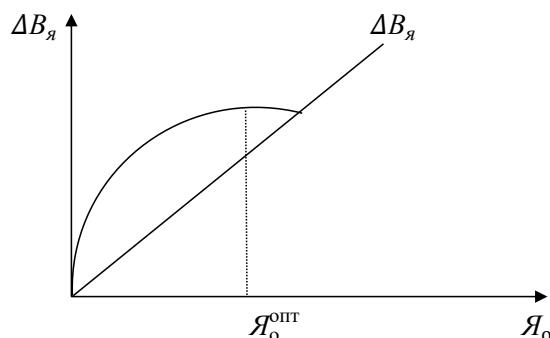


Рис. 2. Визначення оптимального рівня якості транспортного обслуговування

Розрахунок конкретних величин ефекту (прибутку) чи ефективності (рентабельності) проводиться за методикою визначення економічної ефективності заходів маркетингу транспортних підприємств. У цьому слід розрізняти заходи, що потребують певних інвестицій, і організаційно-технічні (безінвестиційні) заходи, що виконуються за рахунок поточних витрат. У першому випадку необхідно дисконтування капіталовкладень з урахуванням термінів їхньої окупності, тоді як у другому виробляється пряме порівняння результатів із витратами.

Певну складність розрахунків показників якості та ефективності становить відсутність обліку деяких із них у транспортній статистиці. Тому додаткову інформацію необхідно отримувати шляхом проведення маркетингових досліджень. Величина додаткового доходу може бути отримана як різниця між доходами, отриманими до та після введення заходів щодо підвищення якості транспортного обслуговування за порівнянний період.

Необхідно відзначити, що підвищення якості транспортного обслуговування клієнтів, як кінцевої мети, неможливе без підвищення якості експлуатаційної роботи, впровадження нових технологічних рішень в організацію перевізного процесу, поліпшення взаємовідносин з користувачами транспорту [5,6]. При цьому перевага має надаватися інтересам споживачів транспортних послуг. Так, з метою прискорення доставки та забезпечення збереження вантажів у ряді випадків необхідно відмовитися від ущільненого навантаження та максимізації ваги, забезпечуючи ефективність роботи транспорту за рахунок оптимального рівня тарифу і якості обслуговування.

Основні засади практичної роботи щодо підвищення якості транспортного обслуговування полягають у наступному:

- якість транспортного обслуговування клієнтів має бути ключовим пріоритетом злагодженої роботи всіх працівників транспортного підприємства;
- важливим завданням працівників транспортного підприємства має бути не лише контроль за якістю перевезень, а й постійне вдосконалення тих аспектів транспортного обслуговування, від яких якість залежить;
- постачальники технічних засобів та рухомого складу, необхідних для транспортного обслуговування, повинні стати надійними партнерами транспортних підприємств у забезпеченні якості перевезень;
- робота з покращення якості транспортних послуг повинна проводитися на всіх рівнях і в усіх підрозділах, включаючи ремонтний сервіс, а відповідальність за неякісні перевезення має бути спільною для всіх працівників.

#### Висновки

Таким чином, для підвищення якості транспортного обслуговування вантажовласників та пасажирів необхідно ефективно використовувати всі наявні можливості, вдосконалювати методи управління та організації роботи транспортних підприємств, а також запроваджувати нове управлінське мислення серед працівників. Це

передбачає використання передових технологічних рішень, оптимізацію логістичних процесів, підвищення кваліфікації персоналу та розвиток партнерських відносин з клієнтами, що сприятиме забезпеченню високого рівня послуг і задоволенню потреб користувачів.

#### Список використаної літератури

1. Москвиченко І. М., Стадник В. Г. Управління якістю транспортно-експедиторського підприємства. *Економічні інновації*. 2011. Вип. 46. С. 261–269.
2. Олійник Н. М., Макаренко С.М. Особливості використання методів бізнес-аналізу щодо забезпечення економічної стійкості та сталого розвитку підприємства // *Методи та інструменти аналізу і прогнозування ринкової ситуації в забезпеченні стійкості суб'єктів господарювання: монографія / за заг. ред. Н.В. Шандової*. Херсон: ОЛДІ–ПЛЮС, 2021. С. 134–147.
3. Ложачевська О.М., Третініченко М.В. Управління якістю послуг транспортних підприємств. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2023. Вип. 114(2). С. 289–294.
4. Луб'яний П.В., Войтович О.А., Кузьменко І.О. Проектний аналіз транспортного підприємства : навчальний посібник. Херсон: книжкове вид-во ФОП Вишемирський В.С., 2024. 280 с. ISBN 978-617-8187-08-8 (електронне видання).
5. Ghobadian A., Speller S., Jones M. Service quality: concepts and models. *International journal of quality and reliability management*. 1994. Vol. 11(9). P. 43–66.
6. Мосьпан В.М. Обґрунтування комплексного критерію ефективності функціонування об'єднаного транспортного підприємства / В.М. Мосьпан // *Автомобільний транспорт : зб. наук. праць*. Вип. 32. Х. : ХНАДУ, 2013. С. 95–99.

#### References

1. Moskvychenko I.M., Stadnyk V.H. (2011) Upravlinnia yakistiu transportno-ekspedytorskoho pidpriemstva [Quality management of a freight forwarding company]. *Ekonomichni innovatsii [Economic innovations]*. Vyp. 46. S. 261–269.
2. Oliinyk N.M., Makarenko S.M. (2021). Osoblyvosti vykorystannia metodiv biznes-analizu shchodo zabezpechennia ekonomichnoi stiiokosti ta staloho rozvytku pidpriemstva // *Metody ta instrumenty analizu i prohnozuvannia rynkovoї sytuatsii v zabezpechenni stiiokosti subiektiv hospodariuvannia: monohrafiia / za zah. red. N. V. Shandovoi* [Features of the use of business analysis methods to ensure economic sustainability and sustainable enterprise development // Methods and tools for analysing and forecasting the market situation in ensuring the sustainability of business entities: a monograph / edited by N.V. Shandova]. Kherson: OLDI–PLIUS. S. 34–147.
3. Lozhachevska O.M., Tretinichenko M.V. (2023) Upravlinnia yakistiu posluh transportnykh pidpriemstv [Quality service management of transport companies]. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo [Automobile roads and road construction]*. Vyp. 114(2). S. 289–294.
4. Lubyaniy P.V., Voitovykh O.A., Kuzmenko I.O. (2024). Proiektnyi analiz transportnoho pidpriemstva : navchalnyi posibnyk [Project analysis of a transport enterprise : a study guide]. Kherson: knyzhkove vyd-vo FOP Vyshemyrskyi V.S. ISBN 978-617-8187-08-8 (elektronne vydannia).
5. Ghobadian A., Speller S., Jones M. Service quality: concepts and models. *International journal of quality and reliability management*. 1994. Vol. 11(9). P. 43–66.
6. Mospan V.M. Justification comprehensive performance criteria for the integrated transport undertaking / V.M. Mospan // *Automobile transport : Coll. Science. works*. Vol. 32. H.: HNAHU, 2013. P. 95–99.

Ю. Р. ЛУСТА

аспірант кафедри лісових машин  
Національний лісотехнічний університет України  
ORCID: 0000-0001-8832-8710

О. С. МАЧУГА

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри лісових машин  
Національний лісотехнічний університет України  
ORCID: 0000-0002-9151-8854

## ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЛІСОВОЇ МАШИНИ З АСИМЕТРИЧНО РОЗМІЩЕНИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ НА ТЕРИТОРІЇ З УХИЛОМ

*Розглянено особливості експлуатації лісових машин на ділянках зі складним рельєфом. Найбільший вплив на виникнення аварійних ситуацій у лісі мають ухил місцевості та нерівності опорної поверхні. Основна увага приділяється проблемам втрати стійкості лісових машин на схилах через асиметричне розміщення націпного обладнання, такого як маніпулятори та телескопічні стріли. Досліджено основні чинники, що впливають на стійкість, такі як ухил поверхні, асиметричні навантаження від робочих органів машини. Запропоновано аналітичну модель для визначення меж безпечної експлуатації, яка включає застосування принципу суперпозиції сил. Цей принцип дозволяє досліджувати стійкість тривісного харвестера під час виконання ним технологічних операцій на похилій опорній поверхні. Запропоновано три варіанти розкриття статичної невизначеності збудованої системи сил.*

*Розроблена методика дозволяє розрахувати граничну вагу стовбура деревини, яку може безпечно обробляти машина, а також визначити безпечні параметри вильоту стріли маніпулятора в залежності від кута повороту стріли маніпулятора, ваги деревини та ухилу місцевості. Окрім цього, збудовано діаграми, що надають візуальне уявлення про допустимі умови експлуатації лісових машин, що можуть бути використані під час планування робіт і знизити ризик аварійних ситуацій, пов'язаних із перекиданням.*

*Продемонстровано, що правильне розміщення машини відносно вантажу та врахування розподілу ваги можуть суттєво підвищити безпеку робіт, що сприятиме зростанню продуктивності в умовах нерівної місцевості.*

*Отримані результати можуть бути використані не лише для підвищення безпеки експлуатації лісових машин, але й в подальшому для автоматизації їхньої роботи, зменшення навантаження на оператора та підвищення ефективності роботи лісової машини в умовах складного рельєфу.*

**Ключові слова:** лісова машина, суперпозиція сил, асиметричне навантаження, ухил місцевості, втрата стійкості.

YU. R. LUSTA

Postgraduate Student at the Department of Forest Machines  
National Forestry University of Ukraine  
ORCID: 0000-0001-8832-8710

O. S. MACHUHA

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Professor at the Department of Forest Machines  
National Forestry University of Ukraine  
ORCID: 0000-0002-9151-8854

## DETERMINATION OF SAFE OPERATION LIMITS FOR A FOREST MACHINE WITH ASYMMETRIC POSITIONING OF THE WORKING TOOL ON SLOPED TERRAIN

*The features of operating forest machines on terrains with complex relief are considered. The greatest impact on the occurrence of emergency situations in the forest is due to the slope of the terrain and unevenness of the support surface. The main focus is on the problems of loss of stability of forest machines on slopes due to the asymmetric placement of mounted equipment, such as manipulators and telescopic booms. The main factors affecting stability, such as surface slope and asymmetric loads from the machine's working units, are investigated. An analytical model is proposed to*

determine the boundaries of safe operation, which includes the application of the superposition principle of forces. This principle allows studying the stability of a three-axle harvester during its technological operations on an inclined support surface. Three options for resolving the static indeterminacy of the constructed force system are proposed.

The developed methodology allows calculating the maximum weight of a tree trunk that can be safely processed by the machine, as well as determining the safe parameters for the manipulator boom's reach, depending on the angle of the manipulator's rotation, the weight of the wood, and the terrain's slope. Additionally, diagrams are constructed to provide a visual representation of permissible operating conditions for forest machines, which can be used during work planning to reduce the risk of accidents related to overturning.

It is demonstrated that the correct placement of the machine relative to the load and consideration of weight distribution can significantly enhance work safety, contributing to increased productivity in uneven terrain conditions.

The obtained results can be used not only to improve the safety of forest machine operations but also in the future for automating their work, reducing operator workload, and increasing the efficiency of forest machine operations in difficult terrain conditions.

**Key words:** forest machine, force superposition, asymmetric load, terrain slope, stability loss.

### Постановка проблеми

Експлуатація лісових машин на територіях зі складним рельєфом, зокрема на ділянках з ухилом більше 30% [5], створює ризики виникнення аварійних ситуацій через втрату стійкості машин. Основними причинами таких інцидентів є асиметричне розміщення робочого обладнання, маніпуляторів і телескопічних стріл, а також нерівності опорної поверхні. Неврахування цих факторів може призвести до перекидання машин та неефективної роботи. В умовах сучасних вимог щодо продуктивності, важливою стає розробка математичних моделей, які дозволять прогнозувати безпечні межі експлуатації та оптимізувати роботу техніки на похилій місцевості. Тому актуальним є дослідження стабільності лісових машин і розробка методик для підвищення їх безпеки та ефективності.

### Формування мети дослідження

Метою даної роботи є визначення меж безпечної експлуатації лісової машини з асиметричним розміщенням робочого органу на території з ухилом. Для досягнення мети в роботі вирішуються такі завдання:

1. Аналіз чинників, що впливають на стійкість лісової машини під час роботи на ухилах, та систематизація існуючих методів для дослідження стійкості.
2. Розробка математичної моделі, яка враховує основні аспекти експлуатації лісової машини на похилій поверхні, зокрема вплив асиметричного навантаження та різних конфігурацій робочого органу.
3. Створення діаграм, що демонструють допустимі умови експлуатації, та визначення критичних параметрів, що впливають на стійкість машини.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останні дослідження в галузі експлуатації лісових машин, починаючи з 70-х років минулого століття, демонструють прогрес у впровадженні спеціалізованих машин для заготівлі деревини. Перші прототипи представляли собою трактори чи вантажні автомобілі з начіпним обладнанням, здатні зрізувати деревину [1]. З розвитком технологій машини стали виконувати складніші операції, включаючи зрізання гілок і розділення стовбура на сортименти, але їх застосування було можливе лише за сприятливих умов опорної поверхні [2].

Завдяки технічному прогресу сучасні лісові машини можуть працювати на складних ділянках із значним ухилом, що підвищує продуктивність. Однак, робота в складних умовах збільшує ризик аварій, зокрема через можливість втрати стійкості та перекидання машин. Транспортні засоби з високим центром ваги та асиметричним розміщенням обладнання особливо схильні до таких ризиків [3, 4]. Стан опорної поверхні, особливо ухил понад 30% і нерівності, мають найбільший вплив на стійкість лісових машин [5].

Для покращення безпеки експлуатації дослідники пропонують різні підходи. Аналітичний підхід включає математичне моделювання транспортного засобу з урахуванням теоретичної механіки, що дозволяє отримати статичні умови рівноваги [7]. Експериментальні методи використовують спеціалізоване обладнання для перевірки параметрів машин у реальних умовах [8]. Комбінування обох підходів забезпечує достовірні результати та сприяє розробці методик прогнозування аварійних ситуацій, що допоможе запобігати небезпечним випадкам і покращувати планування робіт [9, 10].

### Викладення основного матеріалу дослідження

Одним з методів аналітичних досліджень є використання принципу суперпозиції сил. Даний принцип полягає в декомпозиції зовнішніх навантажень з подальшим інтегральним визначенням сумарної поведінки складників механічної системи, зокрема – системи «лісова машина – поверхня руху – предмет обробітку». Такий підхід охоплює як статичні, так і динамічні (нестационарні) чинники, що виникають під час виконання технологічних операцій. Принцип суперпозиції сил базується на припущенні, що дію усіх навантажень можна розглядати незалежними між собою. Для зручності досліджень зовнішні навантаження можна розділити на такі групи [11]:

- Навантаження від ваги усіх елементів транспортного засобу в транспортному (складеному) положенні;

- Асиметричне навантаження під час виконання технологічних операцій;
- Нестаціонарне чи імпульсне навантаження;

Для загального випадку дію зовнішніх навантажень можна записати як суму окремих груп навантажень

$$\sum F = \sum F_i^G + \sum F_i^A + \sum F_i^N, \tag{1}$$

де  $\sum F_i^G$  – Навантаження від ваги усіх елементів транспортного засобу в транспортному,  $\sum F_i^A$  – сума сил асиметричного навантаження,  $\sum F_i^N$  – сума сил нестаціонарної взаємодії окремих складників системи під дією нестаціонарних навантажень в процесі виконання технологічних операцій.

Будування математичної моделі системи «лісова машина – поверхня руху – предмет обробітку» продемонстровано на прикладі тривісного харвестера з робочим органом – стрілою, який виконує технологічні процеси на похилій опорній поверхні з природнім покриттям. Дану модель можна застосовувати для усіх типів транспортних засобів, що використовують робочий орган стрілу, розміщену асиметрично відносно руху машини.

Розглянемо тривісний харвестер (рис. 1), що виконує технологічні процеси на площині  $Ox_1y_2$  вісь руху харвестера  $Oy_2$ .

Систему координат  $Ox_1y_1z_1$  можна утворити шляхом повороту системи координат  $Oxyz$  навколо осі  $Ox$  на кут  $\alpha$ , для утворення системи координат  $Ox_2y_2z_2$  слід систему  $Ox_1y_1z_1$  повернути навколо  $Oz_1$  на кут  $\beta$ . Під час виконання технологічних операцій стріла маніпулятора може виконувати обертання навколо осі кріплення. Кут повороту стріли маніпулятора відносно напрямку руху –  $\gamma$ .

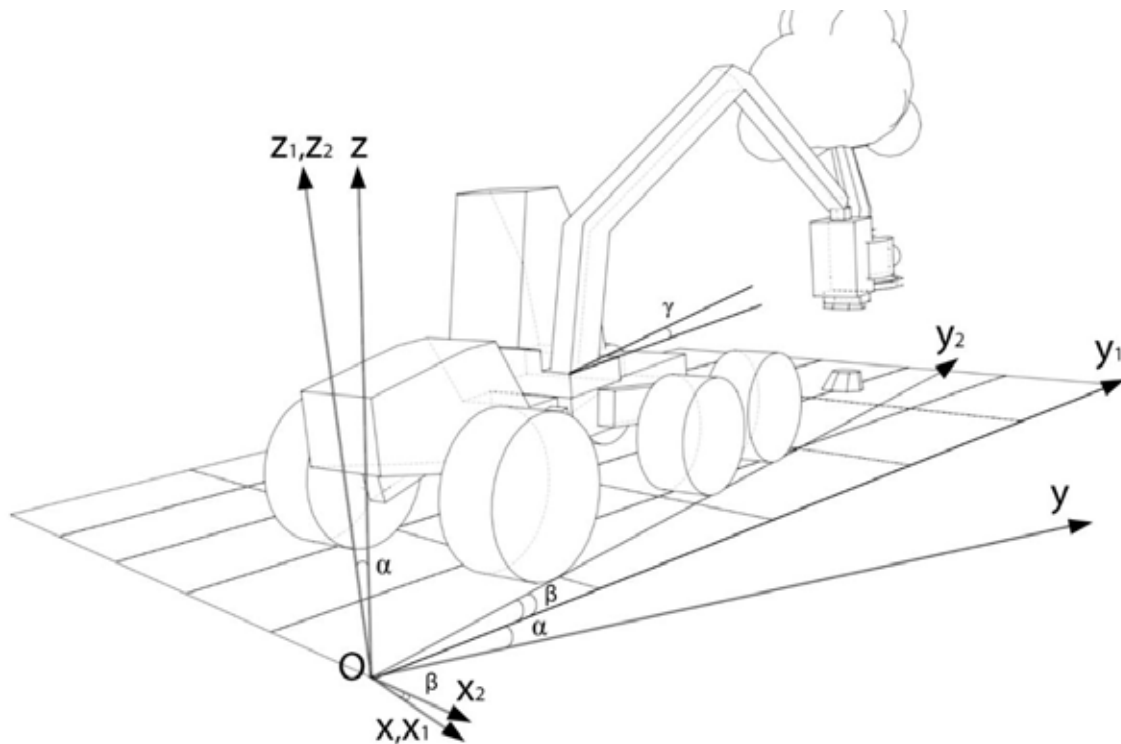


Рис. 1. Модель тривісного харвестера, що виконує рубку лісу на опорній поверхні під ухилом

Для спрощення подальших розрахунків доцільно зробити геометричне будування (рис. 2). На вісь  $Ox$  опустимо перпендикуляр від осі  $Oy_2$ . Точка перетину перпендикуляра з віссю  $Ox$  –  $A$ , точка перетину перпендикуляра з віссю  $Oy_2$  –  $H$ . З точки  $A$  проведено перпендикуляр до осі  $Oy_2$ , точка перетину з віссю –  $B$ . З точки  $B$  опущено перпендикуляр до площини  $Oxy$ , точка перетину з площиною –  $L$ . Вектор центру маси харвестера перпендикулярний до відрізка  $OL$ . Кут між відрізком  $AH$  та площиною  $Oxy$  –  $\zeta$ . Кут між відрізком  $OB$  та площиною  $Oxy$  –  $\theta$ .

У точці контакту колеса та опорної поверхні прийнято прикладати реакцію опорної поверхні, яку можна розкласти на три частини:

- Нормальна реакція опорної поверхні – це сила, яка діє перпендикулярно до опорної поверхні руху.
- Нормальна реакція виникає як відповідь на силу, з якою тіло діє на опорну поверхню, згідно із законом взаємодії (третьім законом Ньютона).

- Тангенціальна реакція опорної поверхні – це сила, що діє вздовж площини руху. Вона виникає як опір ковзанню тіла по поверхні.

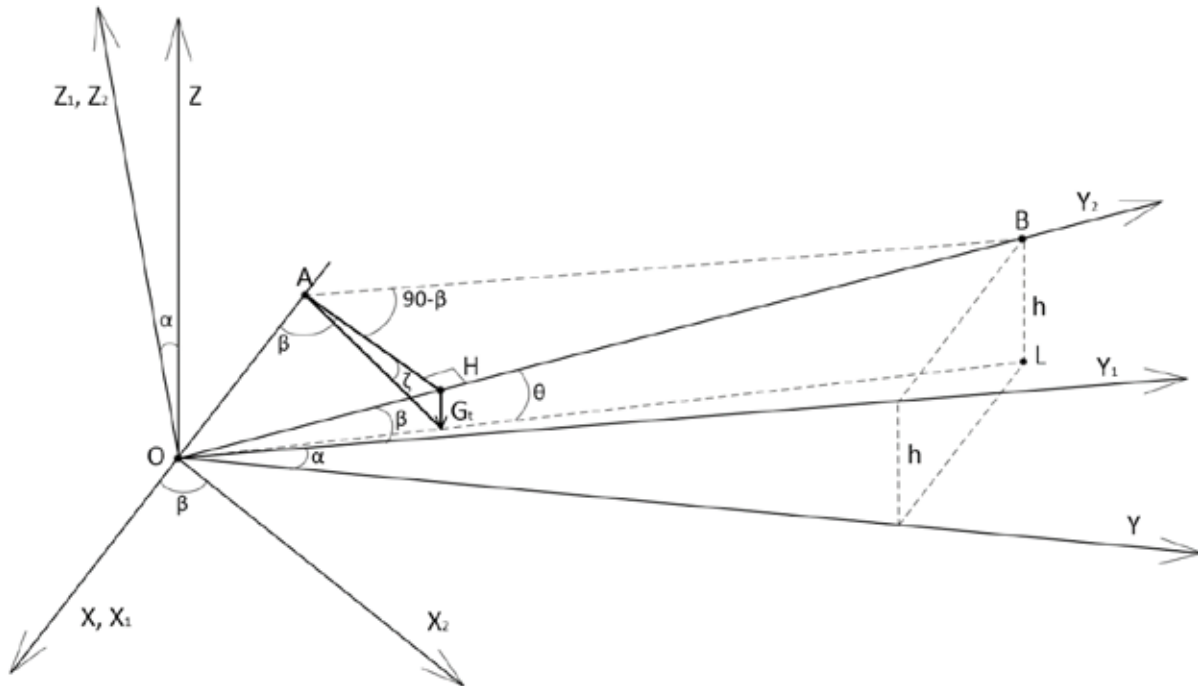


Рис. 2. Геометричне будовання

В подальшому потрібно розділяти втрату стійкості на перекидання та сковзування. Перекидання виникає коли нормальна реакція на одному з коліс є рівною нулю, тобто колесо немає контакту з опорною площиною:

$$R_n = R_n^G + R_n^A + R_n^N = 0, \tag{2}$$

де  $R_n$  – сумарна реакція на найменш навантаженому колесі,  $R_n^G$  – реакція від ваги елементів машини в транспортному положенні,  $R_n^A$  – реакція від асиметричного навантаження,  $R_n^N$  – реакція від нестационарної взаємодії.

Сковзування можливе коли, складові зусиль, що розташовані в площині руху та направлені донизу є більшими за тангенціальні реакції, які можуть бути забезпечені опорною поверхнею:

$$\sum T = \sum T_i^G + \sum T_i^A + \sum T_i^N \leq F_T, \tag{3}$$

де  $\sum T$  – сума тангенціальних реакцій харвестера,  $\sum T_i^G$  – сума реакцій від ваги елементів машини у транспортному положенні,  $\sum T_i^A$  – сума реакцій від асиметричного навантаження,  $\sum T_i^N$  – сума реакцій від нестационарної взаємодії  $F_T$  – тримна здатність опорної поверхні.

Розподілення ваги харвестера між осями є нерівномірним та розраховується для кожної осі окремо [13].

Доцільно виокремити візок (пару ведучих осей над якими розміщена стріла маніпулятора) –  $G_v$ , та на ведучу вісь, під двигуном –  $G_d$ . де  $G = G_T + G_{M1} + G_{M2} + G_G$  – (рис. 4) сума сил від спорядженої ваги харвестера,

$k_d = 1,7 \dots 2,5$  – коефіцієнт динамічності,  $k_p = \frac{4R_v^G}{2R_d^G} = 2,2 \dots 2,6$  – коефіцієнт пропорційності. Сили від ваги харвестера потрібно розкласти на нормальні та тангенціальні для кожного типу коліс окремо.

$$R_d^G = G_d \cos \alpha, R_v^G = G_v \cos \alpha, \tag{5}$$

$$T_d^G = G_d \sin \alpha, T_v^G = G_v \sin \alpha, \tag{6}$$

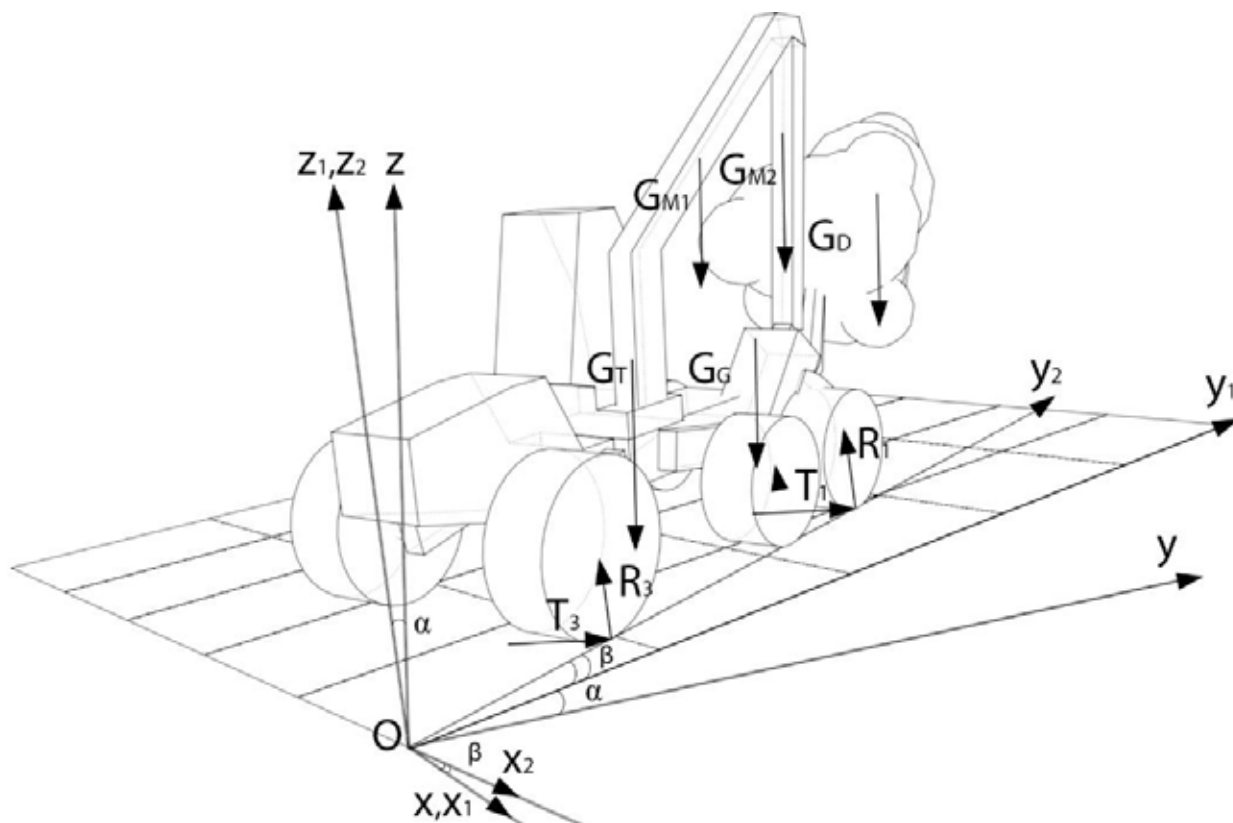


Рис. 3. Напрямок дії сил від ваги елементів харвестера в транспортному положенні

Дослідження впливу асиметричного навантаження відбувається шляхом дослідження плоско паралельних систем сил, які є паралельними напрямку відповідних реакцій (рис. 4).

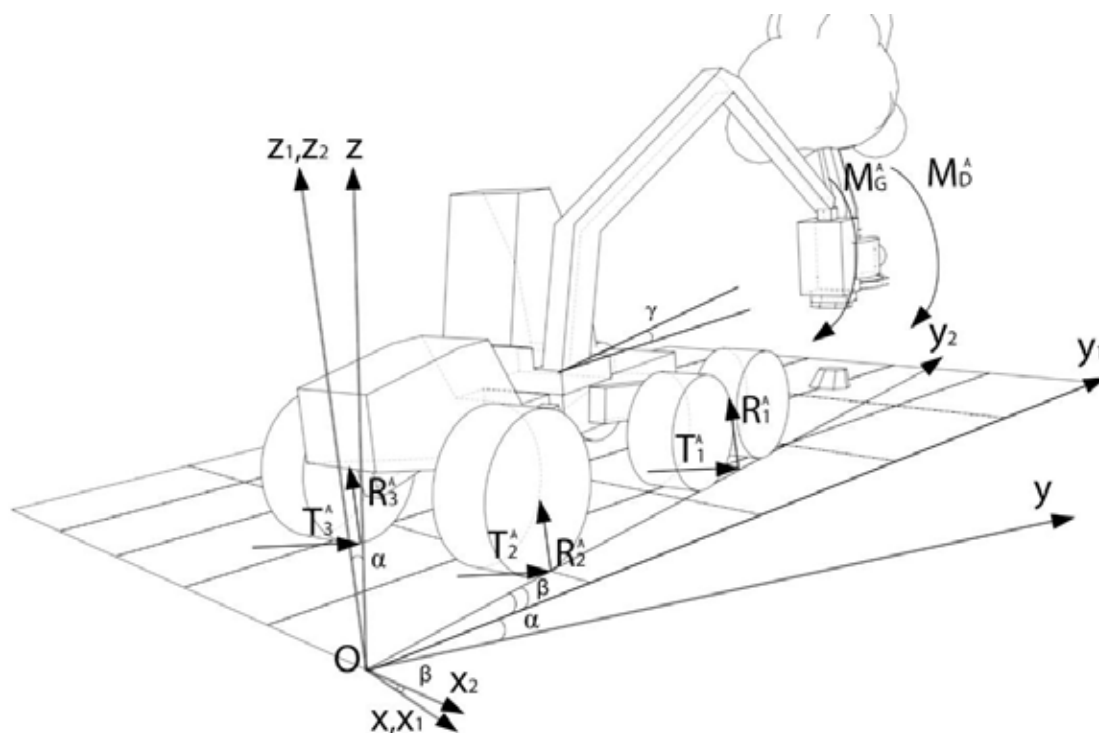


Рис. 4. Асиметричне навантаження ваги головки маніпулятора та стовбура деревини

Для визначення стійкості до перекидання потрібно досліджувати рівновагу нормальних реакцій та складових сил, що діють в протилежному напрямку. Для плоскопаралельної системи сил можна записати 3 рівняння рівноваги.

У розглядуваному випадку ми отримуємо шість невідомих  $R_{1-6}$ . Для зменшення кількості невідомих доцільно звести реакції під колесами візка до середньої точки попарно (рис. 5) замість чотирьох реакцій отримуємо дві реакції  $R_1$  та  $R_4$ .

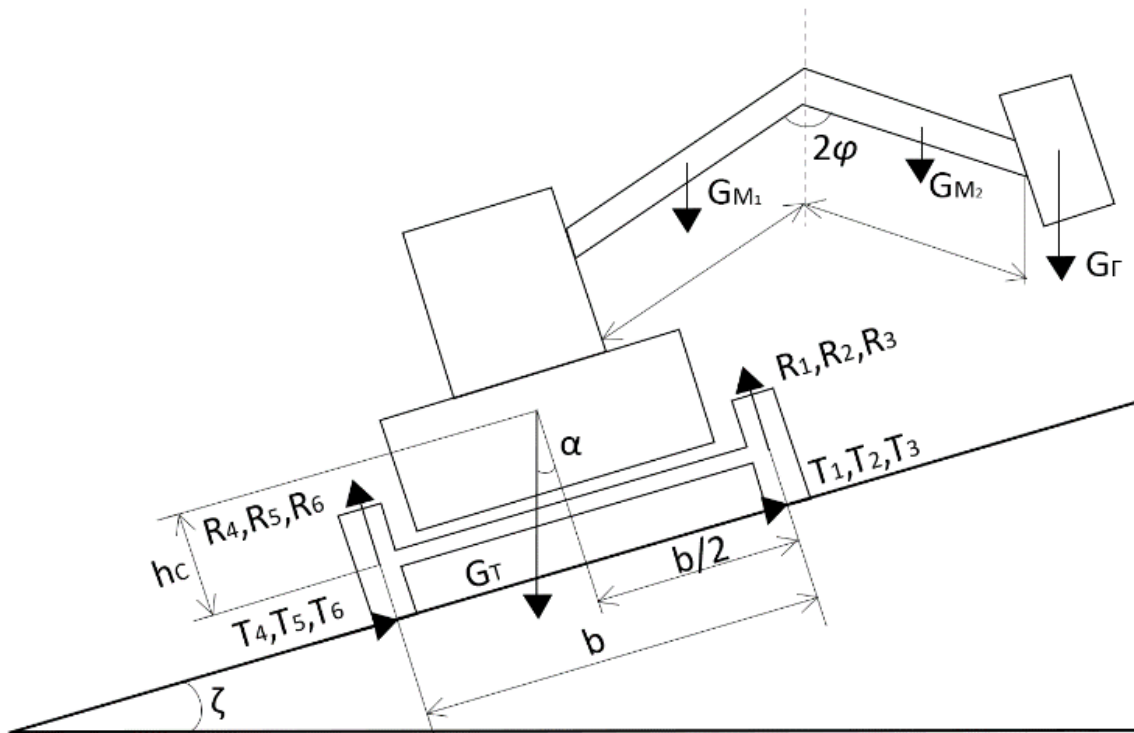


Рис. 5. Плоско паралельні системи сил для визначення нормальних реакцій

Згідно геометричного будовання (рис. 2) для кута  $\zeta$ :

$$\sin \zeta = \sin \alpha \cdot \cos(90^\circ - \beta) = \sin \alpha \cdot \sin \beta \tag{7}$$

Тоді три рівняння рівноваги для визначення впливу на нормальні складники сил:

$$\begin{cases} -(R_3^A + R_2^A) \cdot a - (G_G + G_D) \cdot (L_{M1} - L_{M2}) \cos \gamma \cdot \cos \alpha = 0; \\ (R_1^A + R_2^A - R_3^A - R_4^A) \cdot \frac{b}{2} - (G_G + G_D) \cdot (L_{M1} - L_{M2}) \sin \gamma \cdot \cos \alpha = 0; \\ R_1^A + R_2^A + R_3^A + R_4^A = 0. \end{cases} \tag{8}$$

де  $L_1, L_2$  – довжина першої та другої ланок стріли маніпулятора відповідно,  $a$  – відстань між середньою точкою візку та віссю ведучих коліс,  $b$  – база харвестера.

Розглядувана система сил є один раз статично невизначеною. Запропоновано два методи розкриття статичної невизначеності:

- Аналітичний підхід до розподілу реакцій опорної поверхні між опорами. Розглянено крайні положення стріли маніпулятора на поверхні без ухилу. Перший випадок кут  $\gamma = 0^\circ$  (стріла розміщена між передніми колесами на рівновіддаленій відстані від цих коліс). Для цього випадку сили між задніми  $R_2 = R_3$  та передніми  $R_1 = R_4$  є попарно рівними. Другий випадок  $\gamma = 90^\circ$  (стріла розміщена між боковими колесами на рівновіддаленій відстані від коліс). Для цього випадку справедливим є  $R_1 = R_2$  та  $R_3 = R_4$ . На основі даних залежностей можна зробити припущення, щодо зміни величини реакцій на відрізьку  $\gamma = 0^\circ - 90^\circ$ . Запропоновано моделювання даної зміни наступними залежностями:

а) Лінійна залежність – припущення, що зміна навантаження відбувається лінійно:

$$R_1^A = R_4^A \left(1 - \frac{\gamma}{90}\right) + R_2^A \left(\frac{\gamma}{90}\right) \mid R_4^A = R_1^A \left(1 - \frac{\phi}{90}\right) + R_3^A \left(\frac{\phi}{90}\right). \tag{9}$$



б) Криволінійна (синусоїдальна) залежність – припущення, що зміна навантаження відбувається за синусоїдальним законом

$$R_1^A = R_4^A \cos \gamma + R_2^A \sin \gamma \mid R_4^A = R_1^A \cos \varphi - R_3^A \sin \varphi. \tag{10}$$

де  $\varphi = -\gamma$ , вибір додаткового четвертого рівняння залежить від напрямку повороту стріли маніпулятора (перший варіант рух за годинниковою стрілкою, друге – проти).

• Зведення кількості невідомих до кількості рівнянь. В момент перекидання найбільш ймовірним є відривання одного із задніх коліс, тому доцільно звести точку дії реакцій усіх коліс переднього візка до одного середнього значення, що розміщене в середній точці переднього візка. В результаті можна отримати наступну систему рівнянь:

$$\begin{cases} R_1 + R_2 + R_3 = 0; \\ R_1 \cdot a - (G_D + G_G) \cdot (L_1 + L_2 + a) \cdot \cos \alpha \cos \gamma = 0; \\ (-R_3 + R_2) \cdot b / 2 - (G_D + G_G) \cdot (L_1 + L_2 + a) \cdot \cos \alpha \sin \gamma = 0. \end{cases} \tag{11}$$

де  $R_1$  – реакція, що розміщена в середині візка,  $R_2, R_3$  – реакція заднього правого та лівого коліс відповідно.

Розрахунок реакцій опорної поверхні за системами рівнянь (9), (10), (11) показав, що різниця між отриманими даними становить не більше 4,5% [14].

Тому для спрощення подальших розрахунків доцільно використовувати систему рівнянь (11).

Прирівнявши до нуля реакцію найменш завантаженої опори можна отримати рівняння для визначення граничної ваги вантажу для повороту стріли маніпулятора за годинниковою стрілкою (12). Для визначення ваги вантажу проти годинникової стрілки слід прирівняти до нуля (13).

$$G_D = \frac{ab}{-(L) \cdot \cos \alpha \cos \gamma \cdot b - (L) \cdot \cos \alpha \sin \gamma \cdot 2 \cdot a} - G_G \tag{12}$$

$$G_D = -\frac{ab}{-(L) \cdot \cos \alpha \cos \gamma \cdot b - (L) \cdot \cos \alpha \sin \gamma \cdot 2 \cdot a} + G_G \tag{13}$$

Використовуючи рівняння (12), (13) отримано діаграму, що показує вагу стовбуву, яку здатний безпечно обробляти харветстер на певному ухилі місцевості та з певним вильотом стріли маніпулятора (рис. 6).

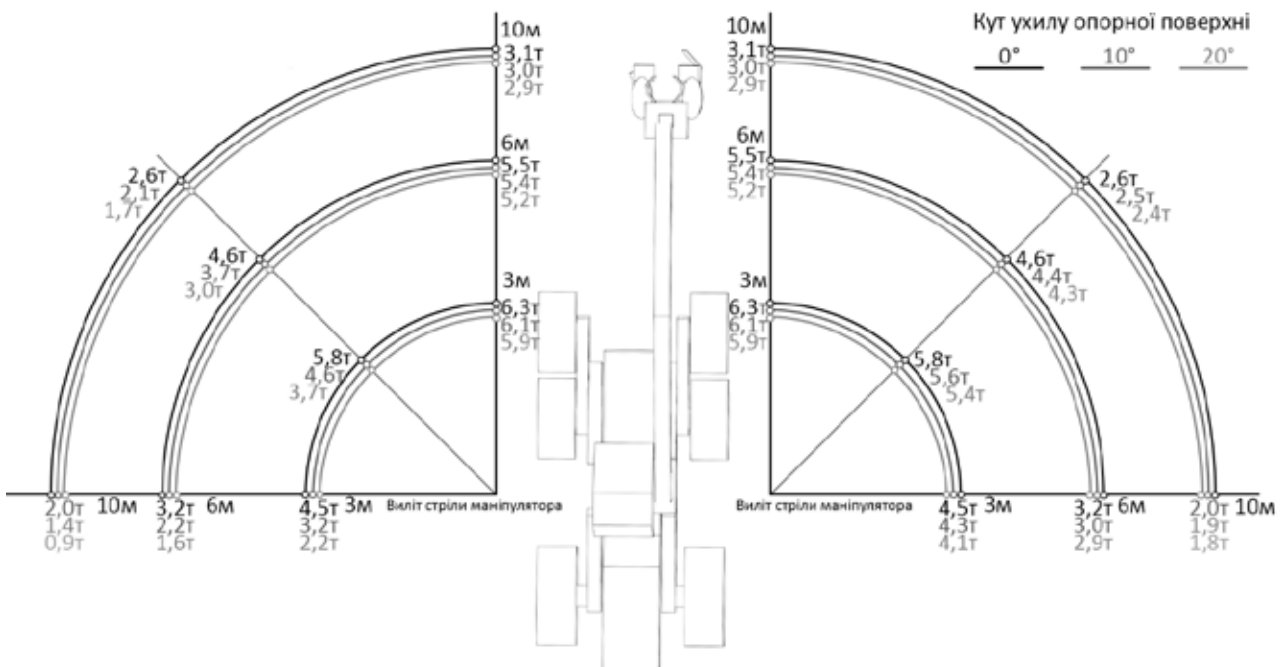


Рис. 6. Діаграма граничної ваги стовбура деревини для харветсера Valmet 911.3

Розв’язано обернену задачу та знайдено безпечний виліт стріли-маніпулятора для фіксованої ваги стовбура деревини. Прирівнявши  $R_3$  до нуля можна отримати рівняння для визначення граничного вильоту стріли

маніпулятора для повороту стріли маніпулятора за годинниковою стрілкою (3). Для визначення граничного вильоту стріли маніпулятора проти годинникової стрілки слід  $R_2$  прирівняти до нуля (4).

$$L = \frac{ab}{-a - (G_G + G_D) \cdot \cos \alpha \cos \gamma \cdot b - (G_G + G_D) \cdot \cos \alpha \sin \gamma \cdot 2 \cdot a} \quad (14)$$

$$L = \frac{ab}{a - (G_G + G_D) \cdot \cos \alpha \cos \gamma \cdot b - (G_G + G_D) \cdot \cos \alpha \sin \gamma \cdot 2 \cdot a} \quad (15)$$

Використовуючи рівняння (14), (15) можна отримати діаграму, що показує граничний виліт стріли маніпулятора для стовбура з фіксованою вагою для певного кута ухилу місцевості (рис. 7).

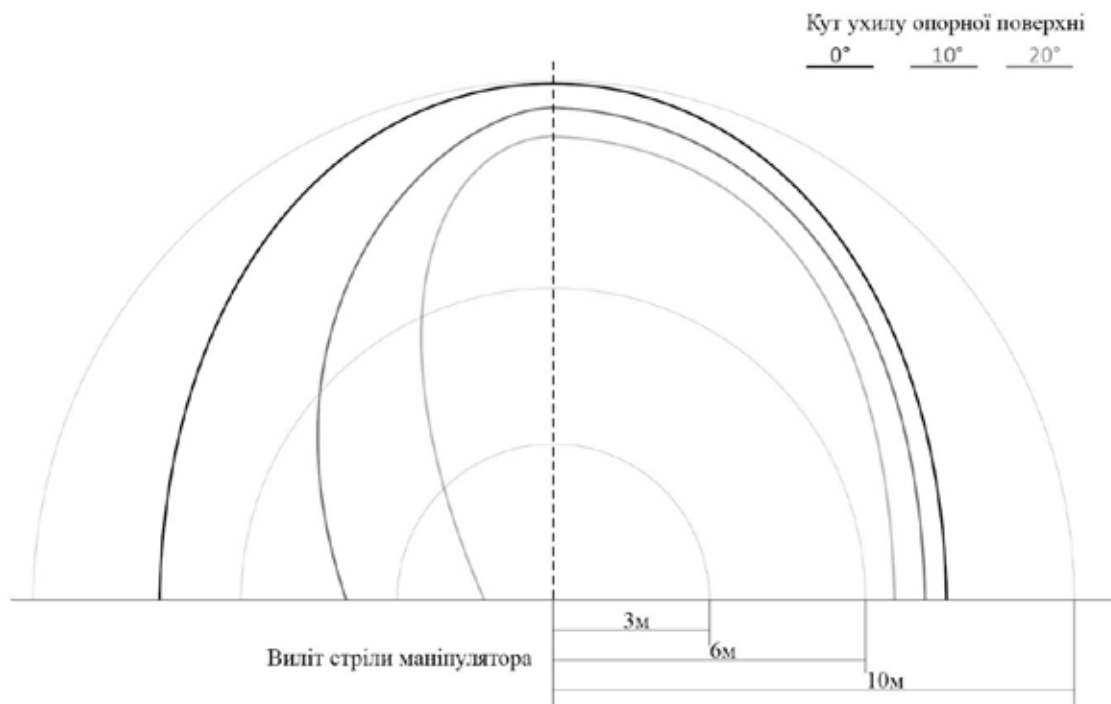


Рис. 7. Діаграма граничного вильоту стріли маніпулятора

### Висновки

Проведений аналіз стану досліджень стійкості спеціалізованої техніки, що виконує роботу у складних експлуатаційних умовах. Це дасть змогу вдосконалювати в подальшому системи керування, що здатні підвищити експлуатаційну безпеку спеціалізованої техніки.

В даній роботі описаний метод математичного моделювання, що дає змогу прогнозування меж безпечної експлуатації. Метод можна використовувати для усіх технічних засобів з робочим органом – стрілу з маніпулятором або іншим технологічним обладнанням.

В результаті дослідження отримано дві діаграми, які дають візуальне розуміння допустимих умов експлуатації. Дані діаграми доцільно використовувати під час планування робіт та для розуміння розміщення транспортного засобу відносно вантажу.

Найменшою вагою, яку здатний обробляти розглядуваний харвестер в залежності від розміщення відносно вантажу та кута повороту є 0,9 т, дане навантаження можливе при максимальному вильоту стріли маніпулятора, та коли вантаж знаходиться нижче центру маси харвестеру (з лівого боку діаграми). Чим ближче стріла наближається до напрямку руху через великий важіль, який протидіє перевертанню. Також чим менша відстань ЧОГО від корпусу харвестеру тим більшу вагу він здатний утримувати. Це зумовлено зменшенням величини крутного моменту, що створює вага вантажу.

Мінімальним є виліт, коли стріла розміщена паралельно поперечному перерізу харвестера. Також зі збільшенням кута ухилу місцевості мінімальний виліт стрімко зменшується з лівого боку (стріла повернута донизу) та майже немає впливу з правого (стріла повернута догори).

Максимальним допустимим є виліт стріли під час розміщення вантажу уздовж корпусу харвестера. Є назначене зменшення в залежності від ухилу місцевості, яке обумовлене загальним зниженням стійкості від роботи на похилій поверхні.

З діаграми можна зробити висновок про велику різницю між мінімальним та максимальним вильотом стріли так максимальний виліт становить 10 м, мінімальний – 1,7 м.

Отримані дані вказують, що для збільшення ваги, допустимої для оброблення стовбура, потрібно розміщувати харвестер нижче по схилу відносно вантажу та розташовувати стрілу харвестера з мінімальним кутом відхилення від напрямку його руху. Доцільно виконувати роботи максимально близько до стовбура.

Використання даних діаграм зможе збільшити продуктивність роботи на місцевості з складним рельєфом, використовуючи правильне позиціонування машини відносно вантажу.

### Список використаної літератури

1. Hakkila P. Logging in Finland. *Acta Forestalia Fennica*. vol. 207. 1989. 21 – 56. URL: <https://doi.org/10.14214/aff.7654>.
2. Bell J. (2002). Changes in logging injury rates associated with use of feller-bunchers in West Virginia. *Journal of Safety Research*. vol. 33(4). 2002. 436 – 471. URL: [https://doi.org/10.1016/S0022-4375\(02\)00048-8](https://doi.org/10.1016/S0022-4375(02)00048-8).
3. Monarca, D., M. Cecchini, A. Colantoni, S. Di Giacinto, G. Menghini, and L. Longo. Study on the possibility of application of a compact roll over protective structure for agricultural wheeled narrow track tractors. *Journal of Agricultural Engineering*. vol. XLIV(e136). 2013. 681 – 685.
4. Jaka K., Mirko M. 2000. Occupational safety and health in Europe's forestry industry. *EU-OSHA – European Agency for Safety and Health at Work*. Publications Office of the EU. vol.28(1). 2007. 55 – 62.
5. Hannes M., Elizabeth Q. Scenarios and causes of rollover incidents with self-propelled. *Agricultural Engineering International*. vol. 16(1). 2014. 236 – 246 URL: <https://www.researchgate.net/publication/287618183>.
6. Mayrhofer H., Quendler E., Boxberger J. Agricultural machinery in Austria. *Journal of Agricultural Engineering*. vol. 44(2). 2013. 57 – 63.
7. Gravalos, I., Gialamas, T., Loutridis, S., Moshou, D., Kateris, D., Xyradakis, P., Tsiropoulos, Z. An experimental study on the impact of the rear track width on the stability of agricultural tractors using a test bench. *Journal of Terramechanics*. vol. 48(4). 2011. 48. 319 – 323 URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2011.04.003>
8. Previati G., Gobbi M., Mastinu G., Mathematical models for farm tractor rollover prediction. *International Journal of Vehicle Design*. vol. 64(4). 280 – 303. URL: <http://dx.doi.org/10.1504/IJVD.2014.058486>.
9. Spencer H., Owen M., Glasbey A. On-site measurement of the stability of agricultural machines. *Journal of Agricultural Engineering Research*. vol. 31(1) 1985. 81–91. URL: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(85\)90126-X](https://doi.org/10.1016/0021-8634(85)90126-X).
10. Bukshetwar P. ADAS using AI. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*. vol. 12(1). 2024. URL: <https://dx.doi.org/10.22214/ijraset.2024.57919>.
11. Shadrin, S., Ivanova A. (2019). Analytical review of standard SAE J3016. *Doroga. Infrastruktura*. vol. 21(3). 2019. 32 – 48.
12. Луста Ю. Р. Метод суперпозиції сил у дослідженні безпечних умов експлуатації лісозаготівельних машин під дією асиметричних навантажень. *Сучасні технології у промисловому виробництві (м. Суми, 18–21 квітня 2023 р.)*. 2023. – С. 232–233. URL: <https://chem.teset.sumdu.edu.ua/images/articles/2023/stpv-2023.pdf>.
13. Білик Б. В. *Теорія та проектування самохідних лісових машин*. Львів: РВВ НЛТУУ, 2014. 297 с.
14. Луста Ю. Р., Мачуга О. С. Обґрунтування розрахункової моделі харвестера на ухилі. *Збірник наукових праць Міжнародної Карпатської Школи: зимова сесія (21–25 лютого 2024 року): 2-ге вид., доповн. Косів: Наукове товариство імені Шевченка*. 2024. С. 162 – 164. URL: <https://www.researchgate.net/publication/382829714>

### References

1. Hakkila P. Logging in Finland. *Acta Forestalia Fennica*. vol. 207. 1989. 21 – 56. URL: <https://doi.org/10.14214/aff.7654>.
2. Bell J. (2002). Changes in logging injury rates associated with use of feller-bunchers in West Virginia. *Journal of Safety Research*. vol. 33(4). 2002. 436 – 471. URL: [https://doi.org/10.1016/S0022-4375\(02\)00048-8](https://doi.org/10.1016/S0022-4375(02)00048-8).
3. Monarca, D., M. Cecchini, A. Colantoni, S. Di Giacinto, G. Menghini, and L. Longo. Study on the possibility of application of a compact roll over protective structure for agricultural wheeled narrow track tractors. *Journal of Agricultural Engineering*. vol. XLIV(e136). 2013. 681 – 685.
4. Jaka K., Mirko M. 2000. Occupational safety and health in Europe's forestry industry. *EU-OSHA – European Agency for Safety and Health at Work*. Publications Office of the EU. vol.28(1). 2007. 55 – 62.
5. Hannes M., Elizabeth Q. Scenarios and causes of rollover incidents with self-propelled. *Agricultural Engineering International*. vol. 16(1). 2014. 236 – 246 URL: <https://www.researchgate.net/publication/287618183>.

6. Mayrhofer H., Quendler E., Boxberger J. Agricultural machinery in Austria. *Journal of Agricultural Engineering*. vol. 44(2). 2013. 57 – 63.
7. Gravalos, I., Gialamas, T., Loutridis, S., Moshou, D., Kateris, D., Xyradakis, P., Tsiropoulos, Z. An experimental study on the impact of the rear track width on the stability of agricultural tractors using a test bench. *Journal of Terramechanics*. vol. 48(4). 2011. 48. 319 – 323 URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2011.04.003>
8. Previati G., Gobbi M., Mastinu G., Mathematical models for farm tractor rollover prediction. *International Journal of Vehicle Design*. vol. 64(4). 280 – 303. URL: <http://dx.doi.org/10.1504/IJVD.2014.058486>.
9. Spencer H., Owen M., Glasbey A. On-site measurement of the stability of agricultural machines. *Journal of Agricultural Engineering Research*. vol. 31(1) 1985. 81–91. URL: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(85\)90126-X](https://doi.org/10.1016/0021-8634(85)90126-X).
10. Bukshetwar P. ADAS using AI. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*. vol. 12(1). 2024. URL: <https://dx.doi.org/10.22214/ijraset.2024.57919>.
11. Shadrin, S., Ivanova A. (2019). Analytical review of standard SAE J3016. *Doroga. Infrastruktura*. vol. 21(3). 2019. 32 – 48.
12. Lusta Y. R. Method of Superposition of Forces in the Study of Safe Operating Conditions of Logging Machines under Asymmetric Loads. *Modern Technologies in Industrial Production* (Sumy, April 18–21, 2023). 2023. pp. 232–233. URL: <https://chem.teset.sumdu.edu.ua/images/articles/2023/stpv-2023.pdf>.
13. Bilyk B. V. *Theory and Design of Self-Propelled Forestry Machines*. Lviv: RVV NLTUU, 2014. 297 p.
14. Lusta Y. R., Machuha O. S. Substantiation of the Calculation Model of a Harvester on a Slope. *Collection of Scientific Papers of the International Carpathian School: Winter Session (February 21-25, 2024)*: 2nd ed., supplemented. Kosiv: Shevchenko Scientific Society. 2024. pp. 162–164. URL: <https://www.researchgate.net/publication/382829714>

В. А. МАРДЗЯВКО

асистент кафедри електроенергетики, електротехніки  
та електромеханіки  
Миколаївський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0001-7327-9215

А. Ю. РУДЕНКО

асистент кафедри електроенергетики, електротехніки  
та електромеханіки  
Миколаївський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-5103-6412

## ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ ГЕНЕРАТОРІВ НВЧ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

Дослідження присвячено оцінці ефективності використання мікрохвильового випромінювання для знезараження зернових культур від мікроорганізмів та шкідників. Актуальність цієї роботи зумовлена необхідністю розробки безпечних та ефективних альтернатив традиційним методам захисту зерна. У експерименті використовувалася мікрохвильовий генератор, що працює на частоті 2,45 ГГц. Результати дослідження показали, що 15-хвилинна обробка зерна мікрохвилями забезпечує знищення понад 90% спор грибів родів *Aspergillus* та *Fusarium*. Для боротьби з зерною вошакою (*Sitophilus granarius*) було встановлено, що нагрівання до температури 55°C протягом 10 хвилин призводить до загибелі 89% шкідників. Порівняно з традиційними пестицидами, які забезпечують знищення шкідників лише на 40% за 30 хвилин, мікрохвильова обробка виявилася більш ефективною та безпечною. Економічний аналіз показав, що вартість мікрохвильової обробки зерна становить близько 50 грн/т, що майже вдвічі нижча за вартість традиційних методів дезінфекції. Крім того, мікрохвильовий метод є більш екологічним, оскільки не передбачає використання шкідливих хімічних речовин. Наголошено, що мікрохвильова технологія має значний потенціал для застосування в сільському господарстві. Завдяки здатності ефективно знищувати шкідників та збудників хвороб, мікрохвильові установки можуть бути використані для знезараження зерна після збору врожаю. Це дозволить зменшити втрати врожаю та підвищити якість продукції. Порівняно з попередніми розробками в галузі мікрохвильової обробки, запропонований метод характеризується більш високою ефективністю, нижчими операційними витратами (зниження на 30%) та екологічністю. У цій статті розглянуто обмеження традиційних методів стерилізації разом із їхніми перевагами, а також переваги застосування мікрохвильової технології для збереження екосистем та здоров'я користувачів. Окрім цього, наведено технічні характеристики, зокрема показники потужності та розміщення джерел випромінювання, які впливають на ефективність стерилізації за допомогою мікрохвильового джерела. Автори роблять висновок, що мікрохвильова технологія має перспективу застосування в сільському господарстві. Це означає, що такі генератори можуть бути використані аграріями для знезараження продукції після збирання врожаю, дозволяючи знизити популяцію шкідників до 90% за короткий період, що, відповідно, зменшує ризик зараження продукції. У порівнянні з попередніми методами мікрохвильової стерилізації, сучасний підхід дозволяє зменшити операційні витрати на 30%, підвищити якість кінцевого продукту та зберегти екологічну чистоту.

**Ключові слова:** електромагнітні хвилі, мікрохвильова обробка, сільське господарство, стерилізація, патогени.

V. A. MARDZIAVKO

Assistant at the Department of Electric Power Engineering,  
Electrical Engineering and Electromechanics  
Mykolaiv National Agrarian University  
ORCID: 0000-0001-7327-9215

A. YU. RUDENKO

Assistant at the Department of Electric Power Engineering,  
Electrical Engineering and Electromechanics  
Mykolaiv National Agrarian University  
ORCID: 0000-0002-5103-6412

## THEORETICAL AND PRACTICAL ASPECTS OF USING MICROWAVE GENERATORS FOR GRAIN CROPS DISINFECTION

The study is devoted to evaluating the effectiveness of microwave radiation for disinfecting grain crops from microorganisms and pests. The relevance of this work is due to the need to develop safe and effective alternatives to traditional methods of grain protection. A household microwave oven operating at a frequency of 2.45 GHz was

used in the experiment. The results of the study showed that a 15-minute microwave treatment of grain ensures the destruction of more than 90% of fungal spores of the genera *Aspergillus* and *Fusarium*. To combat the grain louse (*Sitophilus granarius*), it was found that heating to a temperature of 55°C for 10 minutes leads to the death of 89% of pests. Compared to conventional pesticides, which only kill 40% of the pests in 30 minutes, microwave treatment proved more effective and safer. An economic analysis showed that the cost of microwave treatment of grain is about 50 UAH/t, which is almost twice lower than the cost of traditional disinfection methods. In addition, the microwave method is more environmentally friendly, as it does not involve harmful chemicals. It is noted that microwave technology has significant potential for use in agriculture. Due to the ability to effectively destroy pests and pathogens, microwave installations can be used to disinfect grain after harvesting. This will reduce crop losses and improve product quality. Compared to previous developments in microwave processing, the proposed method is characterised by higher efficiency, lower operating costs (30% reduction) and environmental friendliness. This article discusses the limitations of traditional sterilisation methods, their advantages, and the benefits of using microwave technology to preserve ecosystems and user health. In addition, technical characteristics, such as power and placement of radiation sources, that affect the effectiveness of microwave sterilisation are presented. The authors conclude that microwave technology has the potential to be used in agriculture. Farmers can use such generators to disinfect produce after harvesting, reducing the pest population by up to 90% in a short period and reducing the risk of product contamination. Compared to previous methods of microwave sterilisation, the modern approach reduces operating costs by 30%, improves the quality of the final product and preserves environmental friendliness.

**Key words:** electromagnetic waves, microwave processing, agriculture, sterilization, pathogens.

### Постановка проблеми

Удосконалення сільськогосподарських технологій залежить від багатьох факторів, серед яких одним із найскладніших є забезпечення безпечного та якісного виробництва зерна. Доведено, що використання мікрохвильових генераторів електромагнітного випромінювання (ГЕМВ) на різних стадіях зберігання зернової продукції є ефективним засобом боротьби зі шкідниками та мікроорганізмами. Зокрема, нещодавні дослідження продемонстрували, що мікрохвильове випромінювання на частоті 2,45 ГГц протягом 15 хвилин здатне знизити поширення грибів *Aspergillus* на 92%, а грибів *Fusarium* – на 88% у зернових культурах [5].

Мікрохвильову обробку рекомендується застосовувати в тих випадках, коли хімічні засоби боротьби зі шкідниками виявляються неефективними, як, наприклад, в інтегрованій системі управління шкідниками (ІРМ). За наявними даними, вона знищує приблизно 90% популяції шкідника *Sitophilus granarius*, поширеного у зернових сховищах, протягом 10 хвилин, що є суттєвою перевагою порівняно з іншими методами. Для порівняння, хімічні методи знищують не більше ніж 40% популяції того ж шкідника за 30 хвилин.

Такі результати свідчать про те, що мікрохвильові генератори допомагають не лише зменшити втрати продовольчого зерна від шкідників при зберіганні, які можуть сягати 30% врожаю, але й сприяють підвищенню безпеки кінцевого продукту, усуваючи необхідність у хімічних консервантах. Отже, мікрохвильова обробка пропонує найкращі перспективи у підвищенні безпеки та якості лущеного зерна. Тому зрозуміло, що існує нагальна потреба в пошуку ефективних методів знезараження зерна. Наприклад, використання пристроїв мікрохвильового діапазону (тобто електромагнітного випромінювання надвисокої частоти) пропонує інноваційний підхід у боротьбі з мікроорганізмами.

Однією з ключових проблем, що перешкоджають трансформації сільськогосподарської системи на краще, є неефективність існуючих методів знезараження продуктів харчування, які включають хімічну дезінфекцію. Наприклад, пестициди, що використовуються для боротьби з комахами та бур'янами, негативно впливають на поживні якості зерна та спричиняють забруднення харчових продуктів, що становить загрозу для здоров'я споживачів. За оцінками, шкідники та мікотоксини, такі як *Aspergillus* і *Fusarium*, здатні виробляти токсичні речовини, спричиняють втрати понад 30% річного врожаю.

Ці ортодоксальні процедури також сприяють розвитку резистентності у шкідників, і тому з часом вони стають менш корисними. Наприклад, шкідники *Sitophilus granarius* легко переживуть хімічні пестициди після кількох вегетаційних сезонів хімічних обробок.

Таким чином, існує нагальна наукова та гуманітарна потреба в нових технологіях, які не лише зменшать рівень патогенів, але й збережуть якість продуктів харчування. Мікрохвильові генератори можуть стати такою технологією, проте їх вплив на фізичні та хімічні характеристики зерна має бути ретельно оцінений. Необхідно встановити параметри обробки, які забезпечать максимальну ефективність дезінфекції без шкоди для якості зерна.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Нещодавно проведені додаткові дослідження підтвердили придатність мікрохвильової обробки для промислового та комерційного використання, зокрема, для післязбиральної обробки зернових. Лабораторні тести, наприклад, показали, що біологічні матеріали, оброблені мікрохвильовою установкою (на частоті 2,45 ГГц протягом п'ятнадцяти хвилин, здатні на 90% дезактивувати шкідливі грибки, такі як *Aspergillus* і *Fusarium*, серед інших. Інші дослідження показали, що застосування мікрохвильової обробки дозволяє за короткий час досягти

досить низької щільності, наприклад, шкідників *Sitophilus granarius*. Ці результати дають надію на те, що використання мікрохвильових технологій підвищить безпеку та якість зерна, що зберігається на зерносховищах. В іншому прикладі, дослідження вказані в роботі [1] вказують на те, що окрім переробки зерна, необхідно встановити відповідні генератори, які працюють на частоті та потужності випромінювання вище 20 ГГц. Крім того, Кунденко М. П. та ін. [2] більш інтенсивно досліджували вплив мікрохвильового та радіочастотного випромінювання на зовнішню структуру зерен. Звичайно, було показано, що мікрохвилі не тільки корисні для зменшення бактеріального забруднення зерна, але й сприяють деяким видам діяльності, таким як клітинний метаболізм, що покращує якість зерна. Такі дані демонструють виражений позитивний вплив мікрохвильових систем на посіви зернових культур.

У своїй науковій роботі О. Петровський представив результати експериментальних досліджень функціонування біотехнічної системи для опромінення насіння пшениці високочастотним електромагнітним полем. Опромінення здійснювалося із застосуванням безперервного синусоїдального сигналу різної вихідної потужності, що дозволило визначити вплив цього чинника на якість обробленого насіння [3].

Дослідження Кунденко М. П. та його колегами [2], демонструє значний потенціал для підвищення якості та схоронності зерна. Це дослідження не лише вказує на оптимальні параметри випромінювання, але й відкриває нові можливості для вдосконалення технологій обробки, зокрема, зниження рівня патогенів без шкоди для якості продукції.

Кунденко М. П. та інші автори [4] дослідили функціонування клітин на основі моделей, враховуючи вплив низькоенергетичного електромагнітного поля. Їхні дослідження підтверджують, що застосування таких технологій стимулює розвиток рослин, покращуючи їхню життєздатність і продуктивність. Новизна цих досліджень полягає в спрощенні схеми генератора, який створює імпульс струму, що проходить через фрактальне навантаження, формуючи падіння напруги. Це дозволяє ефективно генерувати електромагнітне поле з контролем параметрів, що в свою чергу покращує результати обробки.

Результати вищеописаних досліджень впливають на розвиток технологій знезараження зернових культур, відкриваючи нові перспективи для їх інтеграції у сільськогосподарські практики, що підвищує якість продукції і зменшує використання хімічних засобів.

Ця потреба в теорії і практиці найбільш очевидна по відношенню до мікрохвильових генераторів для знезараження зерна, де необхідно детально оцінити, як частота, потужність і час опромінення впливають на знищення патогенних мікроорганізмів при збереженні якості зерна. Ще одним важливим фактором, який слід вивчити, є те, як вплив електромагнітного випромінювання змінює фізико-хімічні характеристики зерна, в тому числі під час обробки вологість, склад поживних речовин і життєздатність насіння. Крім того, там, де бажано посилити метаболізм і біологічні процеси, буде корисно провести більше досліджень про те, як електромагнітні поля впливають на метаболізм рослинних клітин. З огляду на безпеку цих систем для працівників сільського господарства та навколишнього середовища, а також фінансові наслідки впровадження таких технологій у порівнянні з уже існуючими методами знищення бур'янів, буде проведена оцінка їхньої ефективності. Ці дослідження допоможуть покращити механізацію переробки, мінімізувати витрати на сировину, підвищити якість продукції та зменшити негативний вплив традиційних методів переробки на навколишнє середовище.

#### Формулювання мети дослідження

**Метою** дослідження є теоретичне обґрунтування доцільності розробки джерела електромагнітного випромінювання для знезараження зернових культур на елеваторах. Зокрема це буде зосереджено на:

1. Дослідження принципів дії електромагнітних хвиль на шкідників, що пошкоджують сільськогосподарські культури, з метою визначення їх оптимальних ефективних частот та потужностей, що забезпечить максимальний ефект знезараження.

2. Специфіка оцінки ефективності електромагнітного знезараження, тобто показники, що розглядаються для порівняння – потужність випромінювання, час обробки, рівень загибелі шкідників, збереження якості зерна. Також буде проведена оцінка економічних витрат на переробку та екологічних ефектів, що дозволить продемонструвати переваги використання електромагнітної технології порівняно з традиційними засобами.

3. Аналіз технічних характеристик та параметрів джерела випромінювання, його частоти та потужності, типу антени та системи управління.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

На сьогоднішній день у світі спостерігається зростання кількості шкідників сільськогосподарських культур, що протидіє зростанню рівня агротехнічних підходів у сільському господарстві. Це вимагає впровадження інших методів контролю, наприклад, генераторів електромагнітних хвиль (ГЕХ) [5]. За допомогою цієї технології пестициди поки що не застосовуються, проте можна безпечно знезаражувати посіви та ефективно боротися зі шкідниками.

Значним викликом у процесі зберігання зернових культур є розвиток мікроскопічних грибів родів *Aspergillus* та *Fusarium*, які призводять до мікотоксикозів та значних економічних втрат. Обробка зерна мікрохвилями

з частотою 2,45 ГГц виявляє високу ефективність у знищенні цих патогенів. Механізм дії хвильового випромінювання полягає в нагріванні води всередині клітин мікроорганізмів, що призводить до їх загибелі. Дослідження показують, що 15-хвилинна обробка зерна електромагнітним випромінюванням (ЕМВ) знищує понад 90% мікроорганізмів, не впливаючи суттєво на якість зерна. Однак, вартість обладнання та енерговитрати є обмежувачами факторами для широкого застосування цієї технології в сільському господарстві (табл. 1) [6].

Механізм дії ЕМВ на мікроорганізми полягає в дипольно-релаксаційному нагріванні молекул води, що входять до складу клітин. Це призводить до денатурації білків, руйнування клітинних мембран та інших біологічних структур, що є життєво необхідними для функціонування мікроорганізмів. Зокрема, обробка зерна електромагнітним випромінюванням на частоті 2,45 ГГц протягом 15 хвилин забезпечує знищення понад 90% спор грибів родів *Aspergillus* та *Fusarium*. Цей метод має значну перевагу над традиційними хімічними методами дезінфекції, оскільки не передбачає використання токсичних речовин та забезпечує більш високий рівень безпеки харчових продуктів [4].

Згідно з дослідженнями Гавриленка О. С. та співавторів [16], антибіотикотерапія, тривалістю 30 хвилин, призвела до зниження кількості бактеріальних патогенів лише на 60%. Водночас, застосування електромагнітного випромінювання забезпечило більш ефективне пригнічення росту мікроорганізмів на рівні 70% порівняно з контрольною групою. Отримані результати свідчать про вищу ефективність електромагнітних технологій у дезінфекції зерна, що підтверджує їхню перспективність для забезпечення безпечного зберігання харчових продуктів [16].

Таблиця 1

## Результати експериментів на зразках зерна

Тип зараження	Зниження популяції (%)	Час обробки (хв)	Температура (°C)
<i>Aspergillus</i>	92	15	60
<i>Fusarium</i>	88	15	60
<i>Sitophilus granarius</i>	90	10	55
<i>Helicoverpa armigera</i>	85	10	55

Джерело: створено авторами на основі даних [6]

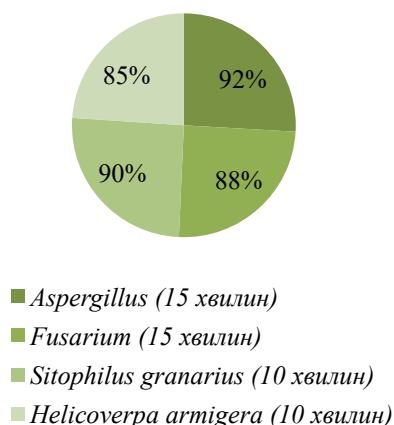


Рис. 1. Зниження популяції шкідливих організмів за типами зараження

Джерело: створено авторами на основі даних [6]

З рисунка 1 видно, що обробка електромагнітними хвилями виявилася найбільш ефективною у боротьбі з *Aspergillus* та *Sitophilus granarius*. Ці результати є обґрунтованими, оскільки зазначені шкідники характеризуються високим рівнем шкодочинності за умов високої щільності популяції. Це свідчить про те, що електромагнітне випромінювання може використовуватися як альтернатива хімічним засобам боротьби зі шкідниками, які нерідко мають нижчу ефективність і є досить токсичними для довкілля.

Крім того, результати, отримані в цьому дослідженні, продемонстрували, що придушення популяції шкідників можна досягти за допомогою електромагнітних хвиль навіть за умови значно меншої кількості обробок порівняно з тими, що потрібні для таких комах-шкідників, як *Helicoverpa armigera*. Це підтверджує доцільність застосування цього методу для захисту посівів зернових культур.

Дослідження показали, що електромагнітна дезінфекція (ЕМД) має значні переваги над традиційними методами, як свідчать результати проведених експериментів. Наприклад, застосування хімічних засобів, таких як фунгіциди, займає близько 30 хвилин і дозволяє зменшити чисельність цільової популяції лише на 40%. Окрім



меншої ефективності, хімічні методи сприяють розвитку стійкості у шкідників і створюють загрозу токсико-хімічного забруднення.

Метод інфрачервоного випромінювання [13] може забезпечити зниження чисельності шкідників на 60% за 20 хвилин, проте цей метод супроводжується високими витратами енергії та потребує дорогого обладнання. З іншого боку, електромагнітна дезінфекція є швидким і ефективним засобом боротьби з мікроорганізмами та шкідниками за порівняно короткий час і з мінімальними витратами ресурсів.

Застосування електромагнітних хвиль (ЕМХ) дозволяє значно скоротити витрати, пов'язані з протруюванням зернових культур. Ця технологія також мінімізує витрати, пов'язані з обробкою та знижує ризики, пов'язані з використанням хімічних речовин. Завдяки практичності електромагнітної знезаражувальної технології (ЕМЗ), фермери мають можливість суттєво підвищити якість та безпеку своєї продукції, що підтверджено даними, наведеними в таблиці 2.

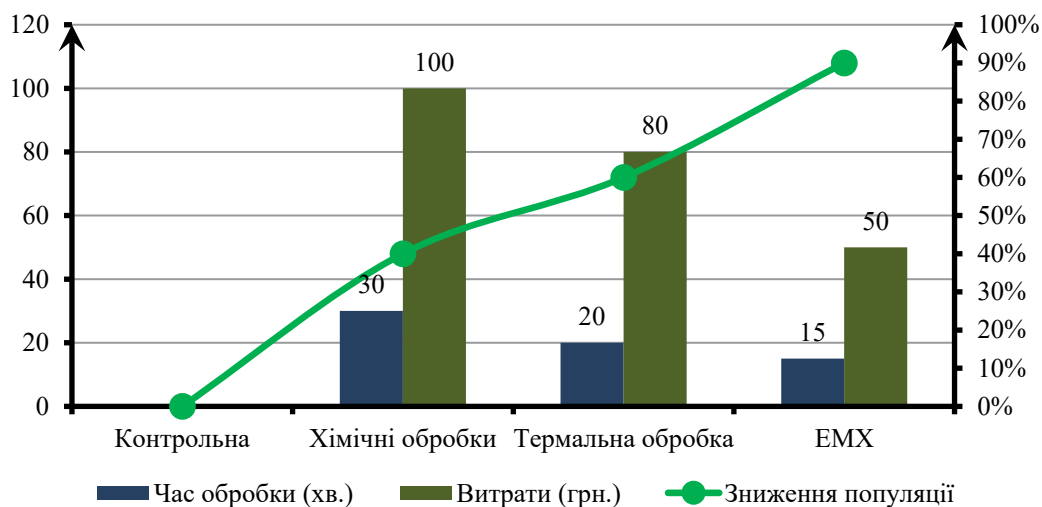
Таблиця 2

**Порівняння ефективності різних методів обробки**

Метод обробки	Зниження популяції (%)	Час обробки (хв.)	Витрати (грн.)
Контрольна	0	0	0
Хімічні обробки	40	30	100
Термальна обробка	60	20	80
ЕМХ	90	15	50

Джерело: створено авторами на основі даних [7]

На основі даних, представлених на графіку (рис. 2), чітко простежуються переваги застосування електромагнітної дезінфекції порівняно з традиційними методами. У випадку використання ЕМП ключовим фактором стає час, необхідний для зниження патогенного навантаження, що має вирішальне значення при зберіганні зернових культур. Менш ефективні результати хімічної та парової обробки свідчать про потребу в подальшому вдосконаленні цих технологій.



**Рис. 2. Порівняння ефективності методів обробки**

Джерело: створено авторами на основі даних [7]

З графіка (рис. 2) помітно, що, незважаючи на високі витрати на традиційні методи обробки, їхня ефективність суттєво поступає сучасним методам електромагнітної дезінфекції. Це підтверджує необхідність подальших інвестицій у розвиток систем електромагнітної обробки, що дозволить оптимізувати витрати на обробку продукції та підвищити якість зерна.

Ефективність мікрохвильових генераторів залежить від таких параметрів, як частота, потужність і тип антени. Частота 2,45 ГГц є найбільш придатною для промислових процесів, оскільки вона оптимально підходить для дипольно-релаксаційного нагрівання молекул, що містяться в клітинах мікроорганізмів. Потужність понад 1 кВт є достатньою для обробки великих обсягів продукції. При використанні рупорних антен електромагнітні хвилі рівномірно поширюються по всій оброблюваній площі, що сприяє максимальній ефективності процесу і досягненню найкращих результатів.

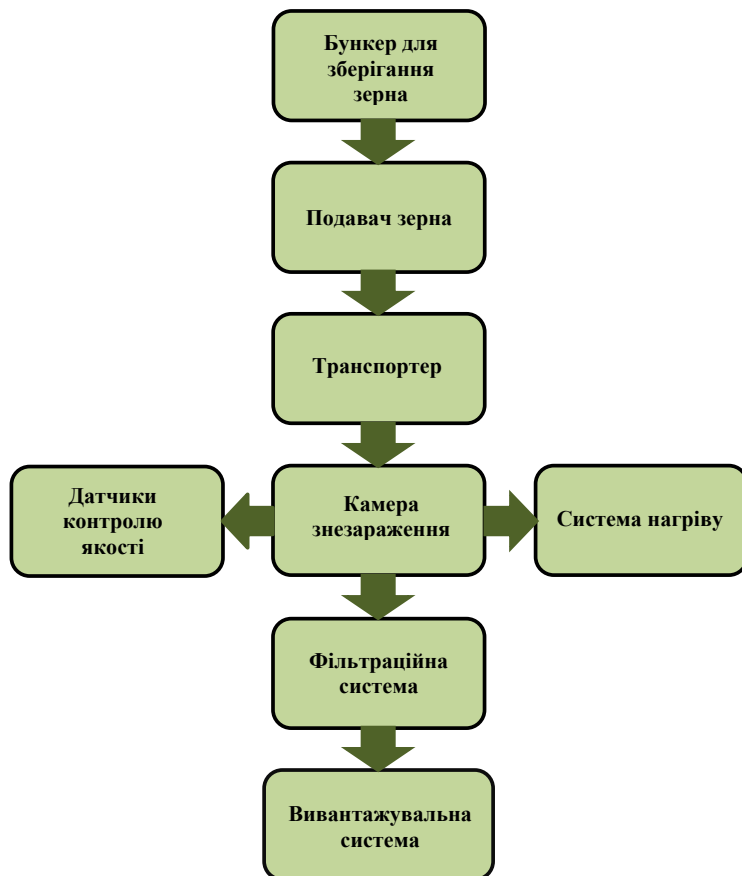


Рис. 3. Блок-схема основних елементів установки для знезараження

Джерело: власна розробка авторів

Блоки управління в сучасних генераторах електромагнітних хвиль (ГЕХ) відіграють ключову роль в оптимізації процесів знезараження. Датчики температури забезпечують точний контроль оброблюваної поверхні температури оброблюваного матеріалу, запобігаючи його перегріванню, що може негативно вплинути на якість зерна. Дослідження показали, що перевищення температури понад 60°C призводить до втрати 15–20% поживних речовин у зерні, що негативно впливає на його загальну якість.

Щодо рівня потужності випромінювання, інтегровані датчики забезпечують можливість регулювання потужності генератора в режимі реального часу. Це дозволяє підтримувати оптимальний рівень випромінювання, який коливається в межах від 600 до 1000 Вт, що є ефективним для знезараження. За потужності 800 Вт час обробки зерна скорочується до 10 хвилин, що дозволяє знищити до 90% патогенних мікроорганізмів при збереженні належної якості зерна.

Застосування точних датчиків у блоках управління не тільки оптимізує процеси знезараження, але й гарантує збереження високої якості зерна, мінімізуючи економічні втрати, пов’язані з погіршенням товарної вартості продукції.

Окремо варто звернути увагу на необхідність підготовки технічних матеріалів і документації, які містять схеми підключення та інструкції з експлуатації. Це полегшує налаштування обладнання та забезпечує безпеку його використання. Новітні конструктивні й технологічні рішення у генераторах здатні значно підвищити їхню продуктивність і ефективність (табл. 3).

Таблиця 3

Технічні характеристики генераторів НВЧ

Параметр	Значення	Одиниці	Коментар
Частота	2.45	ГГц	Оптимальна для обробки
Потужність	1.0	кВт	Максимальна потужність
Тип антени	Рупорна	-	Для рівномірного покриття
Системи контролю	Автоматизовані	-	Для забезпечення безпеки

Джерело: створено авторами на основі даних [8]

Згідно з даними, наведеними в таблиці 3, технічні параметри мікрохвильових генераторів, зокрема частота 2,45 ГГц, є найбільш оптимальними для ефективної переробки сільськогосподарських зернових культур [5]. Висока потужність до 1 кВт забезпечує продуктивну обробку великих обсягів продукції, що робить цю технологію придатною для комерційного використання.

Застосування спеціальних типів антен, таких як рупорні антени, сприяє рівномірному розподілу електромагнітних хвиль, що є важливим для уникнення появи «гарячих точок» під час обробки. Системи управління підвищують безпеку та надійність роботи генераторів, що є ключовим фактором для фермерів, які прагнуть зберегти високу якість своєї продукції.

Існують різні етапи, яких слід дотримуватися під час розробки генератора електромагнітних хвиль (EMX). Перший етап полягає у визначенні матеріалів, що забезпечують найкращі характеристики випромінювання. Наприклад, магнетрони, які використовуються в генераторах, мають бути схвалені для застосування в сільському господарстві, щоб оцінити їх ефективність і безпеку. Крім того, важливо вибирати матеріали з високою теплопровідністю для підвищення надійності під час тривалої експлуатації [9; 10].

Процес створення генератора потребує особливої уваги до деталей. Зокрема, встановлення системи охолодження є критично важливим, оскільки вона запобігає перегріванню, що може знижувати експлуатаційну ефективність або, у гіршому випадку, призводити до поломки обладнання. У процесі розробки прототипу апарату необхідно здійснити вимірювання та документування стабільності його роботи за різних умов. Це дозволяє визначити експлуатаційні межі апарату і забезпечити його безпечне використання [11; 12].

Завершальний етап передбачає оцінку вихідної потужності. Досліджувані генератори мають вихідну потужність 1,2 кВт, що дозволяє їм ефективно обробляти значні обсяги зерна. Поступове підвищення вихідної потужності та поліпшення якості випромінювання свідчать про успішність розробки й відкривають перспективи для подальших удосконалень (табл. 4).

Таблиця 4

Результати випробувань прототипу генератора

Умови випробувань	Стабільність (%)	Вихідна потужність (кВт)	Якість випромінювання (%)
Висока вологість	95	1.1	90
Низька вологість	98	1.2	95
Температура 25°C	97	1.2	92
Температура 35°C	96	1.1	89

Джерело: створено авторами на основі даних [13; 14]

Завершальним етапом дослідження є оцінка вихідної потужності генератора. Як показано на графіку (рис. 4), генератор демонструє стабільність роботи за різних умов експлуатації, що є важливим для сільськогосподарських технологій. Показники стабільності на рівні 95–98% свідчать про здатність генератора ефективно працювати як у вологому, так і в сухому середовищі. Це є ключовим фактором для забезпечення надійності процесів зберігання та обробки зерна [13; 14].

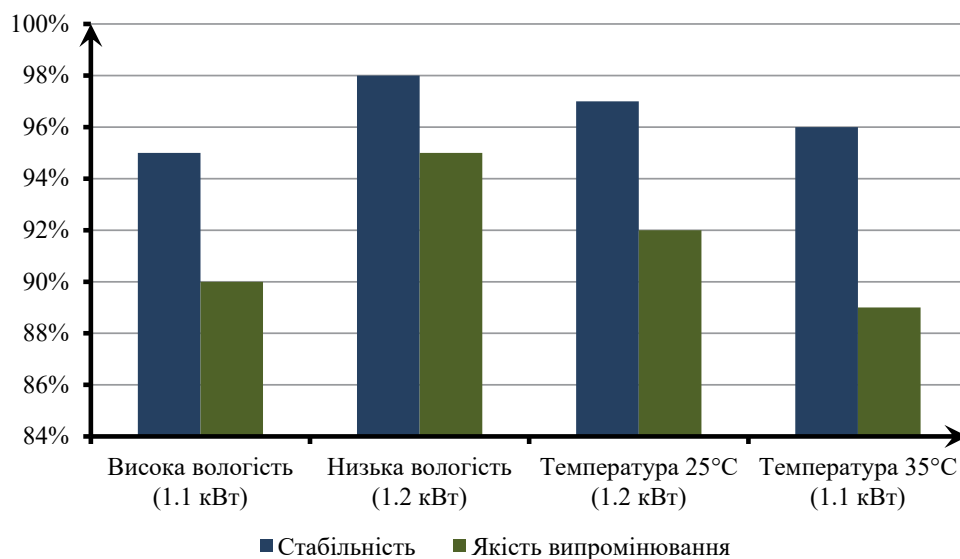


Рис. 4. Результати випробувань прототипу генератора

Джерело: створено авторами на основі даних [13; 14]

Номінальна потужність генератора становить 1,2 кВт, що вказує на його придатність для використання в промислових умовах. Водночас, якість випромінювання залишається в межах допустимих рівнів, що робить його безпечним для знезараження зернових культур [15].

Застосування електромагнітних полів (ЕМП) демонструє значно вищі результати порівняно з традиційними методами, зокрема хімічною обробкою, де ефективність у зниженні кількості патогенних мікроорганізмів зазвичай обмежується 60%. Наприклад, використання мікрохвиль під час обробки зерна забезпечує знищення до 90% шкідливих мікроорганізмів, таких як *Aspergillus* і *Fusarium*, які походять від рослинних шкідників. У той час як стандартні методи вимагають більше часу та значних зусиль для досягнення подібних результатів. Такі показники наочно демонструють ефективність використання генераторів електромагнітних полів (ЕМП) для підвищення якості та дотримання санітарних стандартів сільськогосподарської продукції. Це, в свою чергу, відкриває нові можливості для творчих та інноваційних підходів у цій сфері, особливо завдяки зниженню витрат на переробку продукції та покращенню її екологічної безпеки.

### Висновки

Аналітичні та експериментальні дослідження з використанням пристроїв, що випромінюють електромагнітні хвилі (ЕМХ) для дезінфекції зернових культур, підтвердили їх високу ефективність у боротьбі з різними шкідливими організмами, такими як грибки, бактерії та паразити. Застосування механізмів дії ЕМХ, зокрема нагрівання, резонанс і руйнування клітинних мембран, дозволило знищити до 90% шкідників за 15 хвилин обробки, що суттєво перевищує результати, отримані традиційними методами. Дослідження також показало, що застосування мікрохвиль у боротьбі зі шкідниками, порівняно з класичними методами, забезпечує кращу економічну ефективність при зменшенні втрат діючих речовин. Таким чином, фермери, які прагнуть підвищити якість свого врожаю, можуть скористатися перевагами цієї технології, не завдаючи шкоди навколишньому середовищу. Тенденції в оптимізації частоти та потужності, а також удосконалені системи управління підтверджують ефективність мікрохвильових генераторів у промислових процесах. Висока стабільність роботи цього генератора за різних умов значно спрощує його застосування в сільськогосподарській діяльності.

Впровадження мікрохвильової технології в сільське господарство сприяє значному скороченню використання хімічних пестицидів, що позитивно впливає на екологічну безпеку. Крім того, застосування технології ЕМХ підвищує врожайність на 15–20%, знижує витрати на переробку, покращує якість зернової продукції та створює перспективи для розвитку сталого агробізнесу.

### Список використаної літератури

1. Кунденко М. П., Мардзявко В. А., & Руденко А. Ю. Аналіз технології генерації НВЧ випромінювання з визначенням адаптивного типу діодів для подальшого конструювання апаратів для знезараження. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2023. № 3. С. 24–37. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2023.3.03>
2. Кунденко М. П., Мардзявко В. А., Руденко А. Ю. Вирішення питання якості обробки зерна за рахунок електромагнітного впливу. *Інноваційно-інвестиційний розвиток аграрної сфери – запорука продовольчої безпеки країни* : матеріали міжнародної науково-практичної конференції, 26 травня 2022 р., м. Миколаїв / Міністерство освіти і науки України ; Миколаївський національний аграрний університет. Миколаїв : МНАУ, 2022. С. 12–14.
3. Фізико-математична модель електричних властивостей біологічних тканин насіння пшениці та їх зміна під впливом електромагнітного випромінювання високочастотного діапазону / О.М. Петровський та ін. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2019. Т. 2, № 54. С. 139–143. DOI: <https://doi.org/10.26906/sunz.2019.2.139>
4. Development of a Model of Cell Functioning to Measure the Interaction of Low-Energy EMF / M. Kundenko et al. *2022 XXXII International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*, Sozopol, Bulgaria, 7–11 September 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/mma55579.2022.9993093> (date of access: 04.10.2024).
5. Сидорук Ю. К. Електромагнітні технології обробки зерна. *COMING SOON*. URL: [https://kivra.kpi.ua/wp-content/uploads/file/kivra\\_science\\_turovskyi.pdf](https://kivra.kpi.ua/wp-content/uploads/file/kivra_science_turovskyi.pdf) (дата звернення: 04.10.2024).
6. Турянчик В. Чинники, що впливають на якість і безпечність зерна. *УЗА*. URL: <https://uga.ua/meanings/chinniki-shho-vplyvayut-na-yakist-i-bezpechnist-zerna/> (дата звернення: 04.10.2024).
7. Effect of an ultra-high frequency electromagnetic field on the physical properties of spelt grain / N. Osokina et al. *Scientific horizons*. 2024. Vol. 27, no. 3. P. 64–72. URL: <https://doi.org/10.48077/scihor3.2024.64.1>. (date of access: 04.10.2024).
8. Потапов В. О., Жила В. І. Теоретичні та практичні аспекти застосування мікрохвильового й інфрачервоного випромінювання в харчових технологіях: монографія. Харків: ДБТУ, 2024. 136 с.
9. Ruiz-Canales A., García M. F.-V. Sustainable applications in agriculture. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, no. 8. P. 4136. URL: <https://doi.org/10.3390/su13084136> (date of access: 04.10.2024).

10. Application of microwave energy in agriculture / M. Tuhvatullin et al. *Mathematical modelling of engineering problems*. 2023. Vol. 10, no. 2. P. 412–418. URL: <https://doi.org/10.18280/mmep.100204> (date of access: 04.10.2024).
11. Thermal and electromagnetic stator vent design optimisation for synchronous generators / K. Bersch et al. *IEEE transactions on energy conversion*. 2020. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/tec.2020.3004393> (date of access: 04.10.2024).
12. Thermal management of thermoelectric generators for waste energy recovery / P. Fernández-Yáñez et al. *Applied thermal engineering*. 2021. Vol. 196. P. 117291. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117291> (date of access: 04.10.2024).
13. Microwave generators, transmission, and interaction with different materials. *Microwave chemistry*. 2017. P. 31–52. URL: <https://doi.org/10.1515/9783110479935-003> (date of access: 04.10.2024).
14. Стійкість робочих режимів автономних асинхронних генераторів із самозбудженням / Н. Красношапка та ін. *Технічна електродинаміка*. 2024. №(3). С. 47–53. URL: <https://doi.org/10.15407/techned2024.03.047> (дата звернення: 04.10.2024).
15. Abdelaal A. A. A., B. M. E.-D. Effect of Nonionizing Electromagnetic Waves on Some Stored Grain Pests. *Journal of Entomology*. 2014. Vol. 11, no. 2. P. 102–108. URL: <https://doi.org/10.3923/je.2014.102.108> (date of access: 04.10.2024).
16. Гавриленко О. С., Хоміцька О. А., Загорулько О. В. Оцінка впливу мікробіологічних процесів під час зберігання зерна ярої пшениці. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2016. № 4. С. 31–35. URL: <https://doi.org/10.31210/visnyk2016.04.05> (дата звернення: 04.10.2024).

### References

1. Kundenko M. P., Mardziavko V. A., & Rudenko A. Yu. (2023) Analiz tekhnolohii heneratsii NVCh vyprominennia z vyznachenням adaptivnoho typu diodiv dlia podalshoho konstruktivuvannia aparativ dlia znezarazhennia. [Analysis of the technology of microwave radiation generation with the determination of the adaptive type of diodes for further construction of disinfection devices]. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*, no. 3, pp. 24–37. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2023.3.03>
2. Kundenko M. P., Mardziavko V. A., & Rudenko A. Yu. (2022) Vyrishennia pytannia yakosti obrobky zerna za rakhunok elektromahnitnoho vplyvu. [Solving the issue of grain processing quality through electromagnetic influence]. *Innovatsiino-investytsiyni rozvytok ahrarnoi sfery – zaporuka prodovolchoi bezpeky krainy: Materialy mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*, Mykolaiv, 2022, pp. 12–14.
3. Petrovskii O. M., et al. (2019) Fyzyko-matematychna model elektropryvydykh vlastyvopei biologichnykh tkanyn nasinnia pshenytsi ta yikh zmina pid vplyvom elektromahnitnoho vyprominiuvannia vysokochastotnoho diapazonu. [Physico-mathematical model of the electrical properties of wheat seed tissues and their change under the influence of high-frequency electromagnetic radiation]. *Systemy upravlinnia, navihaetsii ta zviazku*, vol. 2, no. 54, pp. 139–143. <https://doi.org/10.26906/sunz.2019.2.139>
4. Kundenko M., et al. (2022) Development of a Model of Cell Functioning to Measure the Interaction of Low-Energy EMF. *2022 XXXII International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*, Sozopol, Bulgaria, 7–11 September 2022. <https://doi.org/10.1109/mma55579.2022.9993093> (date of access: 04.10.2024).
5. Sydoruk Yu. K. (2024) Elektromahnitni tekhnolohii obrobky zerna. *COMING SOON*. [https://kivra.kpi.ua/wp-content/uploads/file/kivra\\_science\\_turovskiyi.pdf](https://kivra.kpi.ua/wp-content/uploads/file/kivra_science_turovskiyi.pdf) (date of access: 04.10.2024).
6. Turianchuk V. (2024) Chynnyky, shcho vplyvaiut na yakist i bezpechnist zerna. *UZA*. <https://uga.ua/meanings/chinniki-shho-vplyvaiut-na-yakist-i-bezpechnist-zerna/> (date of access: 04.10.2024).
7. Osokina N., et al. (2024) Effect of an ultra-high frequency electromagnetic field on the physical properties of spelt grain. *Scientific horizons*, vol. 27, no. 3, pp. 64–72. <https://doi.org/10.48077/scihor3.2024.64> (date of access: 04.10.2024).
8. Potapov V. O., Zhila V. I. (2024) Teoretychni ta praktychni aspekty zastosuvannia mikrokhylovoho i infrakrasnoho vyprominiuvannia v kharchovykh tekhnolohiiakh: monografii. [Theoretical and practical aspects of the application of microwave and infrared radiation in food technologies: monograph]. Kharkiv: DBTU, 136 p. [in Ukrainian].
9. Ruiz-Canales A., & García M. F.-V. (2021) Sustainable applications in agriculture. *Sustainability*, vol. 13, no. 8, p. 4136. <https://doi.org/10.3390/su13084136> (date of access: 04.10.2024).
10. Tuhvatullin M., et al. (2023) Application of microwave energy in agriculture. *Mathematical modelling of engineering problems*, vol. 10, no. 2, pp. 412–418. <https://doi.org/10.18280/mmep.100204> (date of access: 04.10.2024).
11. Bersch K., et al. (2020) Thermal and electromagnetic stator vent design optimisation for synchronous generators. *IEEE transactions on energy conversion*, pp. 1. <https://doi.org/10.1109/tec.2020.3004393> (date of access: 04.10.2024).
12. Fernández-Yáñez P., et al. (2021) Thermal management of thermoelectric generators for waste energy recovery. *Applied thermal engineering*, vol. 196, p. 117291. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117291> (date of access: 04.10.2024).
13. Microwave generators, transmission, and interaction with different materials. (2017) *Microwave chemistry*, pp. 31–52. <https://doi.org/10.1515/9783110479935-003> (date of access: 04.10.2024).

14. Krasnoshapka N., et al. (2024) Stiikist robochykh rezhymiv avtomomnykh asynkhronnykh heneratoriv iz samozbudzhenniam. *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 3, pp. 47–53. <https://doi.org/10.15407/techned2024.03.047> (date of access: 04.10.2024).
15. Abdelaal A. A. A., & B. M. E.-D. (2014) Effect of Nonionizing Electromagnetic Waves on Some Stored Grain Pests. *Journal of Entomology*, vol. 11, no. 2, pp. 102–108. <https://doi.org/10.3923/je.2014.102.108> (date of access: 04.10.2024).
16. Havrylenko O. S., Khomitska O. A., & Zahorulko O. V. (2016) Otsinka vplyvu mikrobiolohichnykh protsesiv pid chas zberihannia zerna yarooho pshenytsi. [Assessment of the impact of microbiological processes during storage of spring wheat grain]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii*, no. 4, pp. 31–35. <https://doi.org/10.31210/visnyk2016.04.05> (date of access: 04.10.2024).

**Л. І. МЕЛЬНИК**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: 0000-0001-5139-3105

**О. М. ШНИРУК**

асистент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: 0000-0001-7840-6201

**Є. А. КОЛОБОВНИКОВА**

студентка кафедри хімічної технології композиційних матеріалів  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: 0009-0002-9645-8114

## ПОЛІМЕРНІ КОМПОЗИТИ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДСІВІВ АНДЕЗИТУ: СТРУКТУРНІ ТА МЕХАНІЧНІ АСПЕКТИ

У даній роботі досліджували полімерні композиційні матеріали на основі відсівів андезиту – мінерального наповнювача, що утворюється як побічний продукт видобутку вулканічних порід та водних дисперсій полімерів, таких як акрилова Policril 590 і бутадієн-стирольна Latex 2012, що використовуються як матриця. Метою роботи було вивчення впливу андезиту на фізико-механічні властивості композитів за умов високого вмісту мінерального наповнювача. Основну увагу приділено аналізу взаємодії між полімерною матрицею і наповнювачем, що дозволило детально дослідити процеси формування порової структури матеріалів.

Дослідження показало, що використання різних типів полімерних зв'язуючих дає можливість ефективно керувати властивостями матеріалів, змінюючи їх водопоглинання, пористість та механічні характеристики. Встановлено, що водопоглинання варіюється в межах від 2,2 до 6,4 % залежно від типу полімерного зв'язуючого та концентрації наповнювача. Відкрита пористість матеріалів коливалася від 3,14 до 12,34 %, що дозволяє контролювати внутрішню структуру композитів під різні сфери використання. Модуль Юнга також зазнавав значних змін і варіювався від 2,5 до 56,6 МПа, що свідчить про можливість регульованої зміни жорсткості композитів залежно від складу. Так використання Policril 590 забезпечувало меншу жорсткість та більшу пластичність, тоді як Latex 2012 демонстрував вищу жорсткість та менше водопоглинання. При максимальній концентрації наповнювача (90 мас.%) з використанням Latex 2012 композит досягав модуля Юнга 56,6 МПа, що значно перевищувало показники аналогічного композиту при заміні зв'язуючого на Policril 590, де цей показник становив 14,1 МПа.

Отримані результати дозволяють ефективно керувати структурою композитів і їхніми фізико-механічними властивостями через варіювання концентрації наповнювача та типу полімерної матриці.

**Ключові слова:** композит, наповнювач, андезит, латекс, склад, структура, пористість.

**L. I. MELNYK**

PhD,  
Associate Professor at the Department of Chemical Technology  
of Composite Materials  
National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
ORCID: 0000-0001-5139-3105

**O. M. SHNYRUK**

Assistant at the Department of Chemical Technology  
of Composite Materials  
National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
ORCID: 0000-0001-7840-6201

Y. A. KOLOBOVNIKOVA

Student at the Department of Chemical Technology of Composite Materials

National Technical University of Ukraine

"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ORCID: 0009-0002-9645-8114

## POLYMER COMPOSITES USING ANDESITE FIVES: STRUCTURAL AND MECHANICAL ASPECTS

*In this work, polymer composite materials based on andesite screenings – a mineral filler formed as a by-product of volcanic rock mining and water dispersions of polymers, such as acrylic Policril 590 and butadiene-styrene Latex 2012, used as a matrix – were studied. The aim of the work was to study the influence of andesite on the physical and mechanical properties of composites under the conditions of a high content of mineral filler. The main attention was paid to the analysis of the interaction between the polymer matrix and the filler, which made it possible to investigate in detail the processes of formation of the pore structure of materials.*

*The study showed that the use of different types of polymer binders makes it possible to effectively control the properties of materials by changing their water absorption, porosity and mechanical characteristics. It was established that the water absorption varies from 2,2 to 6,4% depending on the type of polymer binder and the concentration of the filler. The open porosity of the materials ranged from 3,14 to 12,34%, which makes it possible to control the internal structure of composites for different areas of use. The Young's modulus also underwent significant changes and varied from 2,5 to 56,6 MPa, which indicates the possibility of an adjustable change in the stiffness of the composites depending on the composition. Thus, the use of Policril 590 provided lower stiffness and greater plasticity, while Latex 2012 showed higher stiffness and less water absorption. At the maximum concentration of the filler (90 wt.%) with the use of Latex 2012, the composite reached a Young's modulus of 56,6 MPa, which significantly exceeded the indicators of a similar composite when the binder was replaced with Policril 590, where this indicator was 14,1 MPa.*

*The obtained results make it possible to effectively control the structure of composites and their physical and mechanical properties by varying the concentration of the filler and the type of polymer matrix.*

**Key words:** composite, filler, andesite, latex, composition, structure, porosity.

### Постановка проблеми

У сучасному світі постійно зростає попит на матеріали з підвищеними показниками ефективності, екологічності та інноваційності. У цьому контексті полімерні композиційні матеріали (ПКМ) стають все більш актуальними завдяки їх унікальному поєднанню властивостей, таких як легкість, міцність, стійкість до корозії та хімічних впливів. Проте процес удосконалення ПКМ стикається з певними труднощами, серед яких – необхідність зниження ваги, поліпшення теплоізоляційних властивостей та зменшення негативного впливу на довкілля під час виробництва.

Перспективним шляхом вирішення цих завдань є залучення природних матеріалів. Полімерні матриці можуть бути представлені різноманітними полімерними матеріалами: термопластами, реактопластами або еластомерами [1]. Попри численні переваги полімерної матриці, такі як простота формування, низьке енергоспоживання у процесі виготовлення ПКМ, відмінні структурні властивості та довговічність, основна проблема полягає в тому, що більшість цих матеріалів є розчинними в органічних розчинниках, що створює загрозу для довкілля через викиди парникових газів. У зв'язку з цим, використання вододисперсійних полімерних матриць (ВДПМ) стає перспективним напрямком завдяки ряду переваг. Найважливіша з них – це зниження викидів летких органічних сполук, що робить ВДПМ більш екологічною та безпечною альтернативою для створення ПКМ. Крім того, процес змішування ВДПМ з іншими компонентами ПКМ є простим і тверднення відбувається за кімнатної температури, що забезпечує економію енергії.

Що стосується наповнювачів, використання природних компонентів є перспективним шляхом до створення біокомпозитів, які допомагають вирішити екологічні проблеми на етапах виробництва та експлуатації. Згідно з сучасними уявленнями в матеріалознавстві, взаємозв'язок між складом, структурою та властивостями композитів є ключовим фактором, що визначає їх характеристики. Ці показники залежать від типу наповнювача та матриці, технології виготовлення та параметрів процесу. Ступінь взаємодії компонентів, їх концентрація та рівномірність розподілу в об'ємі впливають на структуру, загальні фізико-механічні та спеціальні властивості композитів.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як дисперсні наповнювачі, зазвичай застосовують природні матеріали, такі як крейда, каолін і графіт. Однак, останнім часом зростає інтерес до вивчення і використання супутніх продуктів видобутку нерудних матеріалів [2, 3]. Особливої уваги набули дослідження, що стосуються застосування вулканічних порід, таких як андезит, який поширений як у світі, так і в Україні [4].

У дослідженні [5] частинки андезиту були інтегровані в поліпропіленову матрицю для оцінки їхнього впливу на механічні й термічні властивості композиту. Результати показали помітне підвищення твердості, термічної стабільності та міцності на розрив, хоча андезит надав жорсткості композиту.



У роботі [6] досліджували андезит як наповнювач для епоксидних композитів. Було встановлено, що додавання андезиту не лише покращує міцність на розрив та зносостійкість, а й підвищує термічну стабільність композиту, особливо коли частинки добре дисперговані в епоксидній матриці.

Дослідники [7] вивчали вплив андезиту на композити на основі каучуку. Було виявлено, що андезит суттєво підвищив стійкість до стирання, що робить такі композити придатними для використання в автомобільній промисловості, зокрема для виготовлення шин. Крім того, андезит забезпечив хімічну стійкість, що продовжило термін служби композиту в агресивних умовах.

У дослідженні [8] було запропоновано модифікацію поверхні андезиту силанами. Автори підкреслили, що функціоналізація таким чином поверхні андезиту значно покращила розподілення часток наповнювача в полімерній матриці та покращила їх взаємодію, що призвело до підвищення механічних характеристик композиту та зменшення його крихкості.

Застосування наповнювачів різного походження дозволяє комплексно вирішувати питання якості композитів та економії ресурсів. Водночас при розробці нових наповнювачів важливо враховувати їхній фізико-хімічний склад, адже це суттєво впливає на кінцеві властивості композитів.

#### Формулювання мети дослідження

Під час розробки наповнювачів різного походження виникає можливість комплексного вирішення завдань якості композитів та збереження ресурсів. Проте виготовлення нових видів наповнювачів потребує уважного врахування особливостей їхнього фізико-хімічного складу, який впливає на характеристики систем та властивості композиційного матеріалу. Це є головною метою даної роботи у контексті композитів на основі андезиту з полімерним зв'язуючим.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Об'єктом даного дослідження стали композиційні матеріали на основі системи андезит – сополімер при підвищеному вмісті наповнювача концентрація якого змінювалась в межах 65–90 мас.%. Дослідження включали поєднання фізико-хімічних методів аналізу відсівів андезиту та композитів з його використанням. Зокрема, гранулометричний склад визначався за допомогою ситового аналізу; поверхню зразків аналізували за допомогою скануючого електронного мікроскопа JSM. ІЧ-спектри записувалися на спектрофотографі Specord IR-75 (виробництва Carl Zeiss, Німеччина); термічний аналіз з використанням дериватографа системи F. Paulik, I. Paulik, L. Erdey; абразивну стійкість за допомогою круга Беме; механічні властивості у відповідності до [9].

Технологія виготовлення композиту з використанням водних дисперсій стирол-бутадієнової марки Latex 2012 та акрилової марки Policril 590 як зв'язуючих, а також андезиту (Хустського кар'єру Закарпаття) як наповнювача описана в нашій попередній роботі [10]. Хімічний і мінералогічний склад поверхні, а також характеристики зв'язуючих матеріалів були детально описані в наших попередніх дослідженнях [11, 12].

Відсів андезиту, що використовувались в цьому дослідженні, відзначалися високим вмістом  $\text{SiO}_2$ , а співвідношення  $\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3$  складало 3,5. Оцінку енергетичного стану поверхні частинок андезиту проводили шляхом зчужування при натіканні полярною та неполярною рідинами (вода і ксилол) [13].

Отримані експериментальні дані (табл. 1) свідчать про те, що частинки андезиту краще змочуються полярною рідиною, демонструючи вищий коефіцієнт фільтрації, ніж при змочуванні неполярною. При цьому коефіцієнт ліофільності склав 1,97. Частинки відсівів андезиту мають розвинену поверхню, що складає 10,1 та 5,0  $\text{m}^2/\text{g}$  відповідно по воді та ксилолу.

Таблиця 1

Властивості поверхні андезиту

Змочування при натіканні Коефіцієнт фільтрації, $\text{K} \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3 \cdot \text{с}/\text{г}$		Коефіцієнт ліофільності	Питома ефективна поверхня, $\text{m}^2/\text{г}$		Умовний tg $\delta$
вода	ксилол		вода	ксилол	
0,69	0,35	1,97	10,1	5,0	0,027
1,35	0,63				

Методом ІЧ-спектроскопічного аналізу, виявлено наявність простих сполук, функціональних груп і хімічних зв'язків (рис. 1). Найбільш значущими є коливання структуроутворюючих зв'язків Si–O–Si (діапазон коливань 913–1100  $\text{cm}^{-1}$ ) та зв'язків Si–O–Al з максимумом при 773  $\text{cm}^{-1}$ .

Щодо адсорбованої води, найширший діапазон її хвильових чисел спостерігався в межах 3433–3560  $\text{cm}^{-1}$ . Валентні коливання зв'язків C–H відмічені в інтервалі частот 2847–2980  $\text{cm}^{-1}$ .

Смуга з максимумом при 3433  $\text{cm}^{-1}$  асоціюється з валентними коливаннями O–H вільних силанольних або силандіольних груп, а смуга при 3560  $\text{cm}^{-1}$ , ймовірно, відповідає за коливання, пов'язані з адсорбованою водою.

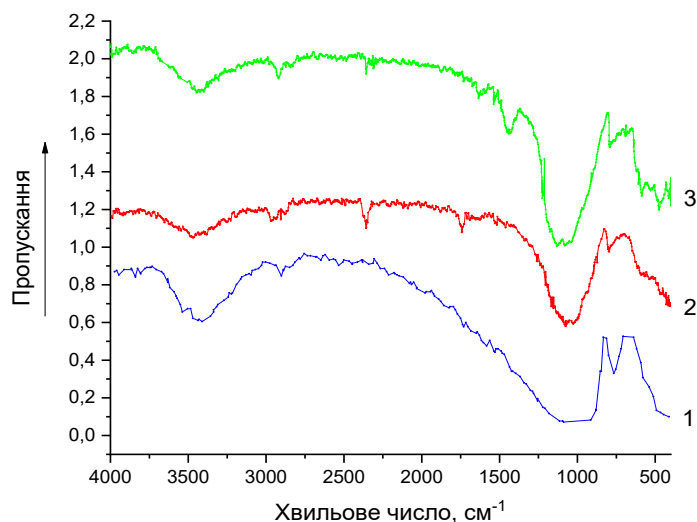


Рис. 1. ІЧ спектр систем: 1 – частинки відсівів андезиту, 2 – Policril 590 + андезит; 3 – Latex 2012 + андезит

Аналіз ДТА-ТГ відсівів природного андезиту показав втрату маси 4,4 %, інтенсивність якої припадає на температуру 100–750 °С, що відповідає виходу поверхневої та поглиненої води (рис. 2).

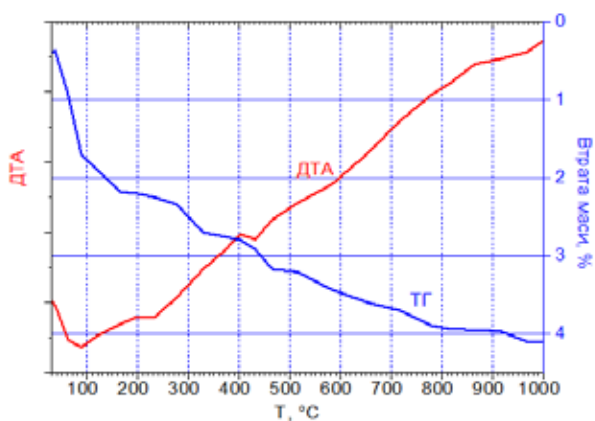


Рис. 2. ДТА-ТГ аналіз відсівів природного андезиту

Оскільки розмір і форма частинок наповнювача суттєво впливають на технологічні й експлуатаційні характеристики композитів, було проведено гранулометричний та електронно-мікроскопічний аналіз відсівів андезиту. Згідно з результатами досліджень (рис. 3), отримана крива розподілу частинок за розміром виявила бімодальний характер. Близько 5% частинок мають розмір менше 63 мкм, тоді як понад 40 % частинок мають діаметр більше 630 мкм.

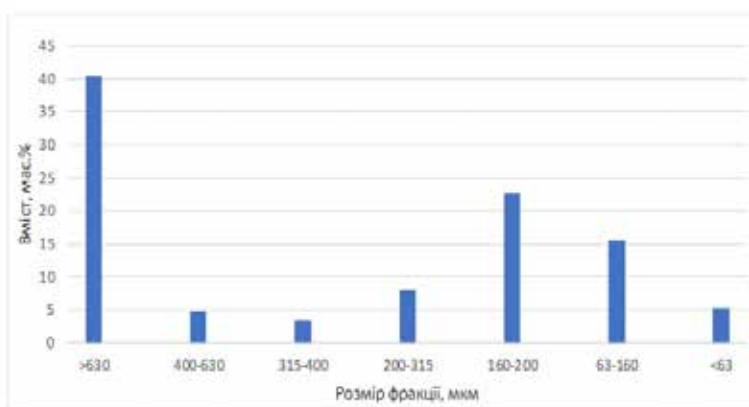


Рис. 3. Гранулометричний склад досліджуваного зразку андезиту

За даними електронної мікроскопії (рис. 4) частинки відсівів андезиту мають неправильну скольчатую форму, а їх розміри корелюються з наведеними даними гранулометрії. При цьому спостерігається певна кількість частинок, близьких до нанорозмірів.

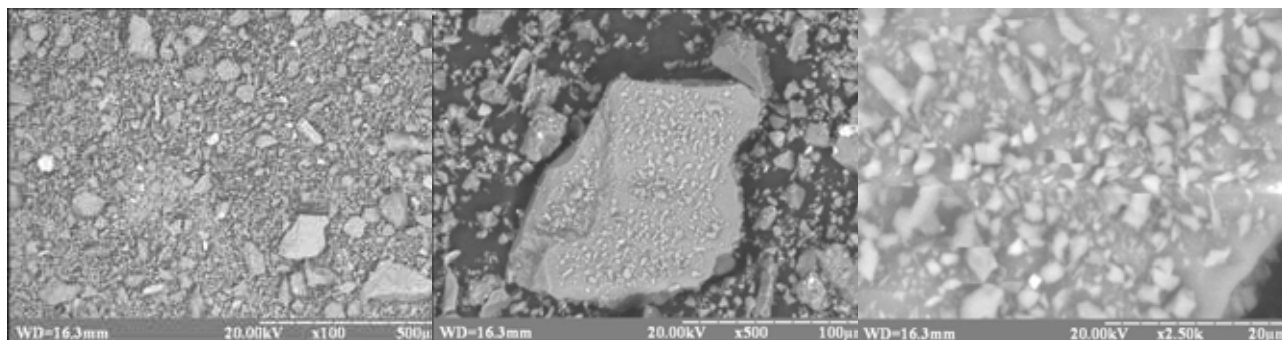


Рис. 4. Електронна мікроскопія зразку відсівів природного андезиту

Під час дослідження взаємодії між наповнювачем і зв'язуючим методом ІЧ-спектроскопії було враховано, що акрилова дисперсія Policril 590 має характерні смуги поглинання: при  $1670\text{ см}^{-1}$ , що відповідає симетричним валентним коливанням  $\text{C}=\text{O}$  у карбоксильній групі; при  $1435\text{ см}^{-1}$  – вібраційним коливанням зв'язку  $\text{C}=\text{C}$ ; при  $1100\text{ см}^{-1}$  – коливанням зв'язку  $\text{CH}$ - [14]. У системі Policril 590 + андезит (рис. 1, крива 2) хід кривої більше відповідає кривій поглинання, характерній для андезиту, але з деякими відмінностями: з'явилася слабка смуга поглинання при  $2250\text{ см}^{-1}$ , що відповідає зв'язку  $\text{C}=\text{C}$ , і при  $1720\text{ см}^{-1}$ , що характерно для зв'язку  $\text{C}=\text{O}$  у полімері. Проте інтенсивність цих смуг є незначною порівняно з вихідним Policril 590, а їхнє зміщення свідчить про наявність взаємодії у системі.

У дослідженнях композитів на основі бутадієн-стирольної дисперсії Latex 2012 (рис. 1, крива 3) враховано, що для Latex 2012 характерні смуги поглинання: при  $2980\text{ см}^{-1}$  – для зв'язків  $\text{CH}$ - в ароматичному кільці; при  $1525\text{ см}^{-1}$  – для самого кільця; при  $2852\text{ см}^{-1}$  – для групи  $\text{CH}_2$ ; і при  $1500\text{ см}^{-1}$  – для подвійного зв'язку стиролу [14]. На отриманій кривій відмічено зниження інтенсивності піку при  $2980\text{ см}^{-1}$  і зміщення піку при  $1720\text{ см}^{-1}$ , що свідчить про міжмолекулярну взаємодію.

Використання методу повного термічного аналізу дозволило отримати більш детальні дані в поєднанні з ІЧ-спектроскопією щодо процесів взаємодії в системі Latex 2012 + андезит (рис. 5 а). Поєднання андезиту зі зв'язуючим суттєво змінює термічну поведінку системи. Дані диференційного термічного аналізу показують ендотермічні ефекти з максимумами при температурах 90, 120, 320 і  $550\text{ }^\circ\text{C}$ , що корелюються зі змінами маси (ТГ) і можуть бути пов'язані з видаленням води та структурними змінами органічних компонентів матриці. Загальна втрата маси системи склала 19,6 мас. %.

Для системи Policril 590 + андезит (рис. 5 б) загальна втрата маси склала 20,2 мас. %, що відповідає структурним змінам, які відбуваються під час нагрівання. Відзначено ендотермічні ефекти при температурах 150, 245, 420 та  $570\text{ }^\circ\text{C}$ .

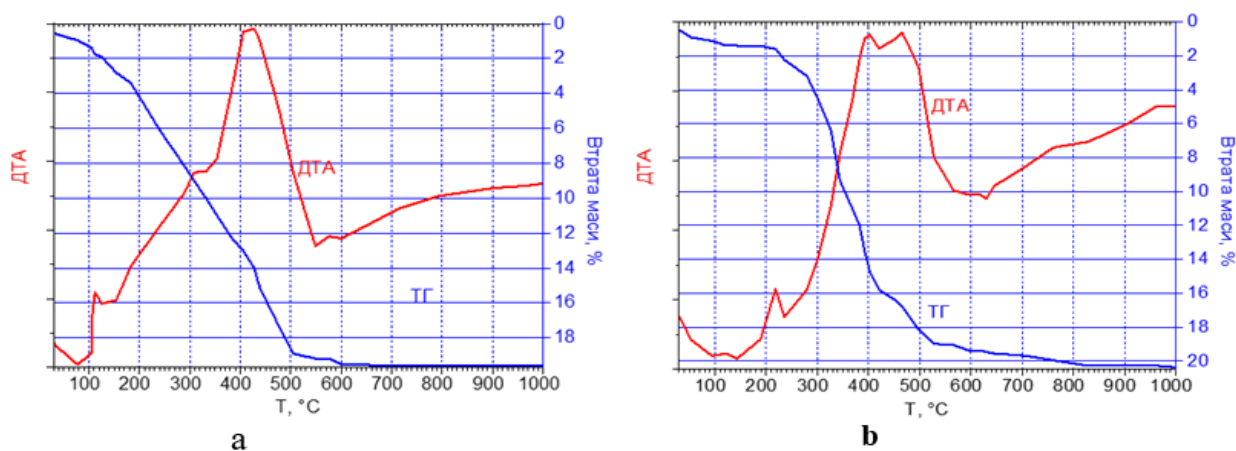


Рис. 5. ДТА-ТГ аналіз системи системи Latex 2012 + андезит (а), та Policril 590 + андезит (б)

Як свідчать результати випробувань показники фізико-механічних властивостей композиту суттєво залежать від концентрації наповнювача – андезиту: із її збільшенням спостерігається зростання водопоглинання та середньої густини. Разом із тим, ступінь зміни цих показників у вказаному інтервалі концентрацій наповнювача досить близькі: водопоглинання для системи Policril 590 + андезит зростає в 1,22 рази, а середня густина – в 1,45 рази. Для системи Latex 2012 + андезит цей приріст відповідно склав: 1,36 та 1,25 рази. Це вказує на деякі відмінності порової структури досліджуваних композитів.

Так, аналіз структури зразків показав (рис. 6), що при зміні співвідношення концентрацій наповнювача та зв'язуючого загальна пористість зростає для системи Policril 590 + андезит у 4,4 рази, для Latex 2012 + андезит у 2,3 рази. При цьому питома частка закритих пор збільшується з 6,8 до 38,2 % – в 5,7 рази для системи на основі Policril 590, для бутадієн-стирольної дисперсії частка закритих пор збільшується з 11,7 до 29,9 % – в 2,6 рази.

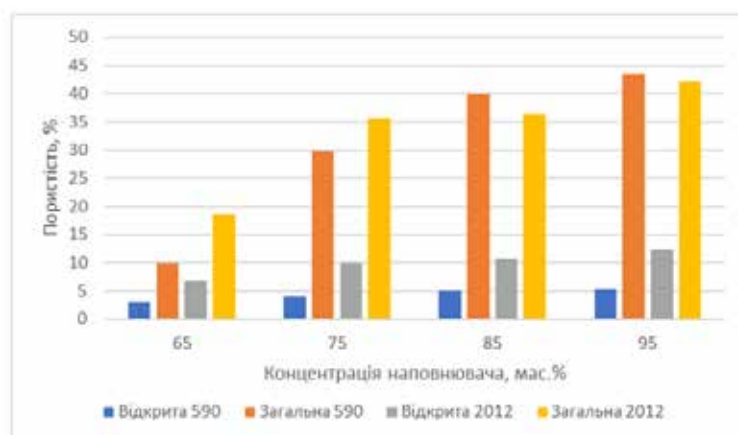


Рис. 6. Залежність пористості від концентрації андезиту (умовні позначення 590 – для системи на основі Policril 590; 2012 – для системи на основі Latex 2012)

Що стосується механічних властивостей, то вони суттєво залежать як від концентрації наповнювача так і густини композиту (рис. 7).

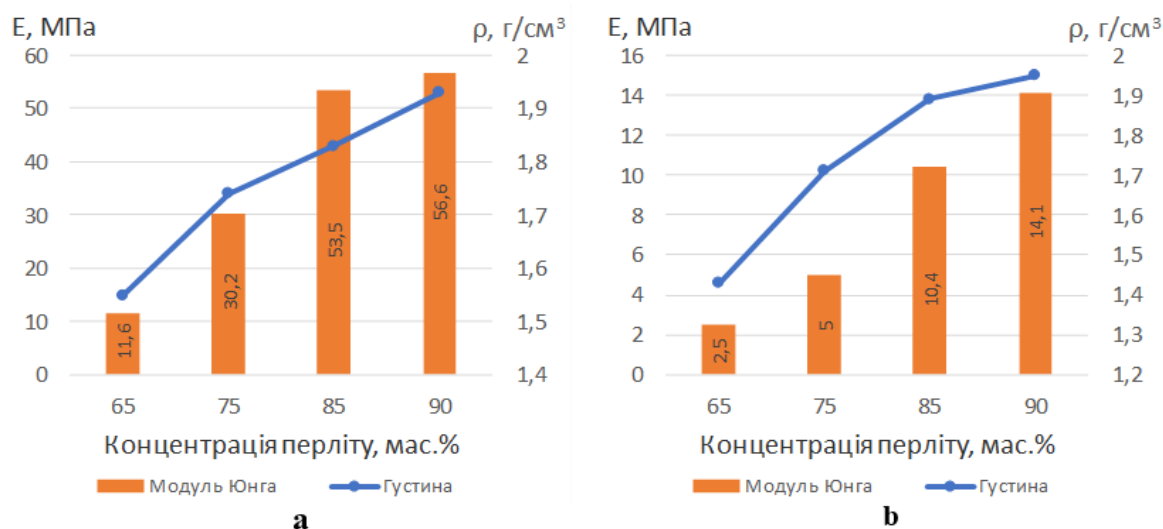


Рис. 7. Залежність густини та модуля Юнга від концентрації наповнювача для системи Latex 2012 + андезит (а), та Policril 590 + андезит (б)

Серед експлуатаційних характеристик досліджуваних композитів відзначаються показники стираності (не перевищують 0,09 г/см<sup>2</sup>), що вказують на підвищену абразивну стійкість матеріалу.

**Висновки**

1. У ході дослідження виявлено специфіку структурування полімерних композитів із застосуванням відсівів андезиту як наповнювача. Було проаналізовано зміну його концентрації в межах 65–90 мас. % при використанні бутадієн-стирольного сополімеру Latex 2012 та акрилової матриці Policril 590.

2. Проведено аналіз гранулометричних характеристик та форми частинок відсівів андезиту, та визначено ступінь їх ліофільності та енергетичний стан поверхні, що впливає на взаємодію з полімерною основою.

3. Окремо розглянуто процеси формування структури композитів та вивчено залежність їх фізико-механічних властивостей від концентрації наповнювача. Показано можливості підвищення міцності, деформаційної та абразивної стійкості створених матеріалів.

#### Список використаної літератури

1. Hamid Essabir, Marya Raji, Sana Ait Laaziz, Denis Rodrique, Rachid Bouhfid, Abou el Kacem Qaiss. Thermo-mechanical performances of polypropylene biocomposites based on untreated, treated and compatibilized spent coffee grounds. *Composites Part B: Engineering*. 2019. № 149. P. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.020>.
2. Melnyk L. I., Chernyak L. P., Sviderskyi V. A., Dorogan N.A. Aspects of making of a composite material when using red mud. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol 2. № (6-92). P. 23-28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.125702>.
3. Melnyk L., Myronyuk O., Ratushnyi V., Baklan D. The feasibility of using red mud in coatings based on glyptal. *French-Ukrainian Journal of Chemistry*. 2020. Vol. 08. P. 88-94. <https://doi.org/10.17721/fujcV8I1P88-94>.
4. Мельник Л. І., Черняк Л.П., Свідерський В.В. Особливості вулканічних порід як матеріалів для полімерних композитів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2022. № 1. Т. 305. С. 14-19. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-305-1-14-19>.
5. Aydın M., et al. Effect of Andesite Powder on the Mechanical and Thermal Properties of Polypropylene Composites. *Journal of Materials Science*, 2017. Vol. 52. № 5, P.2351-2362.
6. Soydal Ulku, Kocaman Suheyla, Marti Mustafa Esen, Ahmetli Gulnare. Study on the reuse of marble and andesite wastes in epoxy-based composites. *Polymer Composites*. 2018. Vol. 39. № 9. P. 3081-3091, <https://doi.org/10.1002/pc.24313>.
7. Kumar S., Patel R. Abrasion Resistance of Rubber-Andesite Composites: Performance in Industrial Applications. *Elastomer Technology Journal*. 2020. Vol. 34. № 6. P. 89-97.
8. Nguyen H., Zhang T. Innovative Approaches in Andesite-Polymer Composite Fabrication. *Composite Materials Science*. 2022. Vol. 13. № 2. P. 278-287.
9. Vovchenko L. L., Matzui L. Y., Zhuravkov A. V., Samchuk A. P. Electrical resistivity of compacted TEG and TEG-Fe under compression. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2006. Vol. 67. № 5-6. P. 1168-1172. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2006.01.042>.
10. Melnyk L. Formation of composite with variation of dispersity of filler and type of binder. *Technical sciences and technologies*. 2024. Vol. 1. № 35. P. 198-203. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-198-203](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-198-203).
11. Мельник Л.І., Черняк Л.П., Пахомова В.М., Шнирук О.М. Керамічний композит на основі вулканічних порід. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34(73). № 2. С. 52-57. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/10>.
12. Melnyk L.I., Cherniak L.P., Yevpak V.V. composites based on fly ash with different polymer matrixes. Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences. 2024. Vol. 2. № 1. P. 106-112. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/18>.
13. Myronyuk O., Baklan D., Nudchenko L. Evaluation of the Surface Energy of Dispersed Aluminium Oxide Using Owens-Wendt Theory. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020. Vol. 2. № 1(52). С. 25-27. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.200756>.
14. Liubov Melnyk1, Lev Chernyak1, Valentin Sviderskyi1, Ludmila Vovchenko, Viktoria Yevpak. Comparative Study of Various Volcanic Materials as Fillers in Polymer Composites. *Zastita Materijala*. 2024. Vol. 65. № 3. <https://doi.org/10.62638/ZasMat1171>.

#### References

1. Essabir, H., Raji, M., Laaziz, S. A., Rodrique, D., Bouhfid, R., & Qaiss, A. e. k. (2018). Thermo-mechanical performances of polypropylene biocomposites based on untreated, treated and compatibilized spent coffee grounds. *Composites Part B: Engineering*, vol. 149, pp. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.020>.
2. Melnyk, L., Sviderskyi, V., Chernyak, L., & Dorogan, N. (2018). Aspects of making of a composite material when using red mud. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 2, № 6/92, pp. 23-28. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.125702>.
3. Melnyk, L., Myronyuk, O., Ratushnyi, V., & Baklan, D. (2020). The feasibility of using red mud in coatings based on glyptal resins. *French-Ukrainian Journal of Chemistry*, vol. 8, № 1, pp.88-94. <https://doi.org/10.17721/fujcV8I1P88-94>.
4. Melnyk L., Sviderskyi V., Chernyak L. (2022). Osoblyvosti vulkanichnykh porid yak materialiv dlia polimernykh kompozytiv. [Features of volcanic rocks as materials for polymeric cposites]. *Herald Of Khmelnytskyi National University*, vol. 305, № 1, pp. 14-19. (in Ukrainian). <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-305-1-14-19>.

5. Aydın, M., et al. (2017). Effect of Andesite Powder on the Mechanical and Thermal Properties of Polypropylene Composites. *Journal of Materials Science*, vol. 52, № 5, pp. 2351-2362.
6. Soydal, U., Kocaman, S., Esen Marti, M., & Ahmetli, G. (2017). Study on the reuse of marble and andesite wastes in epoxy-based composites. *Polymer Composites*, vol. 39, № 9, pp. 3081-3091. <https://doi.org/10.1002/pc.24313>.
7. Kumar, S., Patel, R. (2020). Abrasion Resistance of Rubber-Andesite Composites: Performance in Industrial Applications. *Elastomer Technology Journal*, vol. 34, № 6, pp. 89-97.
8. Nguyen, H., Zhang, T. (2022). Innovative Approaches in Andesite-Polymer Composite Fabrication. *Composite Materials Science*, vol. 13, № 2, pp. 278-287.
9. Vovchenko, L., Matzui, L., Zhuravkov, A., & Samchuk, A. (2006). Electrical resistivity of compacted TEG and TEG-Fe under compression. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 67, № 5-6, pp. 1168-1172. <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2006.01.042>.
10. Melnyk, L. (2024b). Formation of composite with variation of dispersity of filler and type of binder. *Technical sciences and technologies*, vol. 1, № 35, pp. 198-203. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-198-203](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-198-203).
11. Chernyak, L. P., Melnyk, L. I., Pakhomova, V. M., & Shnyruk, O. M. (2023). Keramichniy kompozyt na osnovi vulkanichnykh porid. [Ceramic composite based on volcanic rocks]. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, vol. 2, № 2, pp. 52-57. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/10>.
12. Melnyk, L. I., Cherniak, L. P., & Yevpak, V. V. (2024). Composites based on fly ash with different polymer matrixes. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, vol. 2, № 1, pp. 106-112. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/18>.
13. Myronyuk, O., Baklan, D., & Nudchenko, L. (2020). Evaluation of the surface energy of dispersed aluminium oxide using owens-wendt theory. *Technology audit and production reserves*, vol. 2, № 1/52, pp. 25-27. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.200756>.
14. Melnyk, L., Chernyak, L., Svidersky, V., Vovchenko, L., & Yevpak, V. (2024). Comparative study of various volcanic materials as fillers in polymer composites. *Zastita Materijala*. <https://doi.org/10.62638/zasmat1171>.

В. В. МИХАЙЛЮК

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри нафтогазових машин та обладнання

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ORCID: 0000-0002-3329-2068

## СЕПАРАТОР ДЛЯ ВІДОКРЕМЛЕННЯ КОНДЕНСАТУ ВОДЯНОЇ ПАРИ З ДИМОВИХ ГАЗІВ ЦЕМЕНТНОГО ВИРОБНИЦТВА

Димові гази, що продукуються цементними заводами під час виробництва цементу, негативно впливають на навколишнє середовище. У димових газах, окрім пилу та твердих частинок, також містяться пари води, вуглекислий газ, закис азоту, метан, озон, гексафторид сірки та інші сполуки, які відносяться до парникових газів. На даний час однією з найпоширеніших та основних технологій для зменшення вуглецевого сліду цементної промисловості є технологія уловлювання, зберігання та утилізації вуглецю. Окрім уловлювання викидів вуглекислого газу, ця технологія також допомагає зменшити вплив виробництва цементу на навколишнє середовище шляхом контролю викидів летких органічних сполук, пилу та твердих часток. Впроваджуючи нові технології, удосконалюючи методи виробництва та використовуючи альтернативні варіанти, цементна галузь може зменшити викиди і мінімізувати негативні наслідки для навколишнього середовища. Оскільки пари води є одним із парникових газів, що у результаті призводить до глобального потепління, то її конденсація та вилучення з цих димових газів є актуальним завданням. Для вилучення із димових газів цементних виробництв водяної пари пропонується охолоджувати димові гази до температури конденсації із подальшим вилученням із них краплинної рідини. Найменш затратним способом димовий газ можна охолодити за допомогою пристрою на основі сопла Лавалю, у якому він рухається із надзвуковою швидкістю, а відокремити конденсат пари – з допомогою сепаратійного обладнання (сепараторів). Для цього у даній роботі наведено розроблену функціональну схему установки для виділення рідини і механічних частинок з газового потоку. Відображено будову та описано принцип дії розробленого сепаратора. На розробленій тривимірній моделі сепаратора проведено імітаційні моделювання його роботи з врахуванням як складу газової суміші, так і її витрати, тиску та температури. За результатами імітаційного моделювання встановлено, що 98% рідини сепарується із газорідинної суміші розробленим сепаратором. Проведено експериментальні дослідження виготовленого сепаратора, який було підключено до джерела димових газів цементного виробництва після їх охолодження з допомогою багатосоплового пристрою (сопел Лавалю). У результаті встановлено, що результати імітаційного моделювання та експериментальних досліджень мають незначну розбіжність.

**Ключові слова:** цементне виробництво, вуглекислий газ, сепаратор, газовий потік, імітаційне моделювання.

V. V. MYKHAILIUK

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor at the Department of Oil and Gas Machines  
and Equipment

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

ORCID: 0000-0002-3329-2068

## SEPARATOR FOR SEPARATION OF WATER VAPOR CONDENSATE FROM FLUE GASES OF CEMENT PRODUCTION

Flue gases produced by cement plants during cement production have a negative impact on the environment. In addition to dust and solid particles, flue gases also contain water vapor, carbon dioxide, nitrous oxide, methane, ozone, sulfur hexafluoride and other compounds that belong to greenhouse gases. Currently, one of the most common and basic technologies for reducing the carbon footprint of the cement industry is carbon capture, storage and utilization technology. In addition to capturing carbon dioxide emissions, the technology also helps reduce the environmental impact of cement production by controlling emissions of volatile organic compounds, dust and particulates. By introducing new technologies, improving production methods and using alternatives, the cement industry can reduce emissions and minimize negative consequences for the environment. Since water vapor is one of the greenhouse gases, which ultimately leads to global warming, its condensation and extraction from these flue gases is an urgent task. In order to remove water vapor from the flue gases of cement production, it is suggested to cool the flue gases to the condensation temperature, followed by the removal of droplet liquid from them. In the least expensive way, flue gas can be cooled using a device based on a Laval nozzle, in which it moves at supersonic speed, and steam condensate can be separated using separation equipment (separators). For this purpose, this work presents the developed functional scheme of the installation for the separation of liquid and mechanical particles from the gas stream. The structure and principle of action of the

developed separator are described. On the developed three-dimensional model of the separator, simulation simulations of its operation were carried out, taking into account both the composition of the gas mixture, as well as its consumption, pressure and temperature. According to the simulation results, it was established that 98% of the liquid is separated from the gas-liquid mixture by the developed separator. Experimental studies of the manufactured separator were conducted, which was connected to the source of flue gases of cement production after their cooling using a multi-nozzle device (Laval nozzle). As a result, it was established that the results of simulation modeling and experimental studies have a slight discrepancy.

**Key words:** cement production, carbon dioxide, separator, gas flow, simulation modeling.

### Постановка проблеми

Цементна промисловість є одним із основних джерел викидів парникових газів – приблизно 5–7% від загальних викидів CO<sub>2</sub> від промислових процесів. Окрім викидів CO<sub>2</sub>, виробництво цементу також викидає в навколишнє середовище значну кількість пилу, важких металів та інших забруднюючих речовин [1, 2]. Викид цементними заводами великої кількості твердих частинок (у формі пилу) негативно впливає на якість повітря, спричинює проблеми з диханням і загострює серцево-судинні захворювання. Важкі метали, такі як ртуть, свинець, хром і кадмій, також виділяються під час виробництва цементу. Ці забруднювачі можуть потрапляти в місцеві джерела води, створюючи загрозу для водних екосистем і населення, що споживає цю воду. Вплив на здоров'я може варіюватися від легкого подразнення до важких неврологічних проблем і раку.

Викиди діоксиду сірки (SO<sub>2</sub>) і оксидів азоту (NO<sub>x</sub>) від виробництва цементу сприяють випаданню кислотних дощів, які можуть загрожувати лісовим насадженням, прісним водоймам і навіть завдати шкоди здоров'ю людини, подразнюючи дихальну систему.

Під час виробництва цементу споживається велика кількість води для обробки сировини та боротьби з пилом, надлишок якої з виробничого процесу скидається як стічна вода. Останні можуть містити важкі метали та інші забруднення, що чинить негативний вплив на водні ресурси.

Цементні заводи розташовані зазвичай в регіонах з великими покладами вапняку та іншої необхідної для виробництва сировини. Області з високою щільністю населення поблизу цих заводів найбільш часто страждають, оскільки мешканці піддаються забрудненню як повітря, так і води [1, 2].

Хоча цементна промисловість стикається із серйозними екологічними проблемами, сьогодні вживаються заходи до більш екологічних методів виробництва цементу. Компанії інвестують у такі технології, як уловлювання, утилізація та зберігання вуглецю (CCUS), альтернативні види палива та підвищення ефективності процесів для зменшення викидів CO<sub>2</sub>.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

З метою зменшення впливу виробництва цементу на навколишнє середовище у різних країнах впроваджують контроль за викидами, заохочуючи до використання альтернатив і забезпечуючи фінансові стимули для компаній інвестувати в чистіші технології. Наприклад, Європейський Союз встановив суворі обмеження на викиди важких металів і пилу з цементних заводів. Китай – найбільший світовий виробник – видав нові правила щодо скидання пилу та стічних вод із цементних заводів і встановив цілі щодо використання відновлюваної енергії та скорочення викидів вуглецю. Уряд США надає податкові пільги для розробки та впровадження альтернативних цементних технологій, таких як геополімерний цемент, і системи захоплення та утилізації вуглецю [3, 4].

Наприклад, дослідницька та інноваційна програма Європейського Союзу «Горизонт 2020» підтримує проекти, спрямовані на сталі виробництво цементу. Прикладом є проект «Сталі цементні процеси», який розробляє технології для зменшення викидів вуглецю в цементному секторі. Подібним чином «Zero Waste Cement» Норвезького університету науки і технології та дослідницька програма «GreenCem» у Швейцарській федеральній лабораторії матеріалознавства та технології розглядають розвиток виробництва цементу без відходів [3, 4, 5].

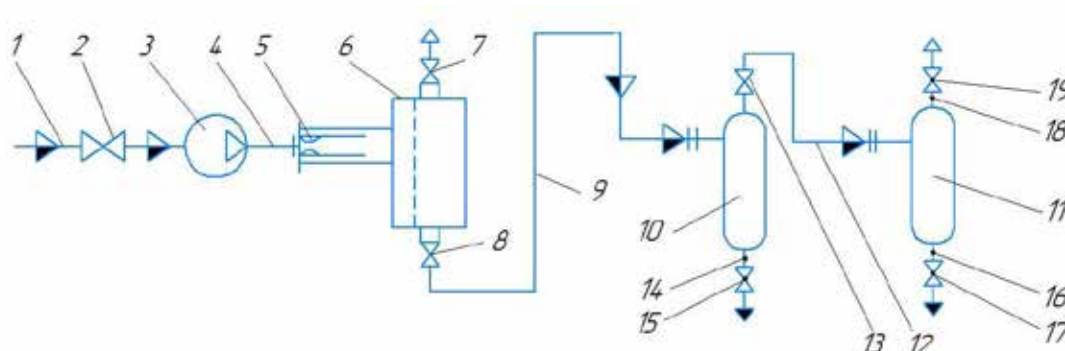
Технологія уловлювання, утилізації та зберігання вуглецю (CCUS) є сьогодні однією із основних для зменшення вуглецевого сліду цементної промисловості. Окрім уловлювання викидів вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>), технологія CCUS також може допомогти зменшити вплив виробництва цементу на навколишнє середовище шляхом контролю викидів летких органічних сполук (ЛОС), пилу та твердих часток (РМ) [6–8].

Необхідно зазначити, що до основних парникових газів в атмосфері Землі відносяться пари води (H<sub>2</sub>O), вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>), закис азоту (N<sub>2</sub>O), метан (CH<sub>4</sub>), озон (O<sub>3</sub>), гексафторид сірки (SF<sub>6</sub>), гідрофторвуглецеві сполуки (ГФВ) і перфторвуглецеві сполуки (ПФВ). Найбільшу роль у парниковому ефекті на Землі відіграє водяна пара, вміст якої в атмосфері становить близько 1% за об'ємом [9].

У роботі [10] для вилучення із димових газів цементних виробництв водяної пари пропонується охолоджувати димові гази до температури конденсації водяної пари та подальшого відокремлення отриманого конденсату. Також за використання такого способу відбуватиметься уловлювання пилу, механічних домішок та інших сполук шкідливих речовин краплинами конденсату.



Для цього розроблено «Спосіб виділення рідини і механічних домішок із газового потоку» особливості якого висвітлені у патенті на корисну модель [11]. Виділення з газового потоку високої температури  $+120\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +160\text{ }^{\circ}\text{C}$  води і механічних частинок здійснюється в декілька етапів при мінімальних енерговитратах. Функціональна схема установки наведена на рисунку 1.



- 1 – патрубок; 2 – запірний елемент; 3 – компресор; 4 – патрубок; 5 – сопловий охолоджувач;  
 6 – буферна камера; 7, 8 – запірний елемент; 9 – відвід; 10, 11 – сепаратор; 12 – патрубок;  
 13 – запірний елемент; 14 – зливний патрубок; 15 – запірний елемент; 16 – зливний патрубок;  
 17 – запірний елемент; 18 – патрубок; 19 – запірний елемент випуску очищеного газу

**Рис. 1. Функціональна схема установки для виділення рідини і механічних частинок з газового потоку**

Спочатку гарячий газовий потік перед надходженням в буферну камеру охолоджується у сопловій камері (за рахунок надзвукової швидкості), де пара перетворюється в дрібнодисперсні краплини рідини. Далі газорідинний потік надходить в каскад сепараторів, де краплинна рідина і механічні частини осаджуються та виводяться через нижні вихідні патрубки сепараторів, а очищений газ – через верхній патрубок кінцевого сепаратора.

Отже, на виході з установки отримується конденсат пари димових газів з наявними у ньому пилом та механічними домішками, який можна утилізувати або, за можливості, повторно використати у технологічному процесі.

З метою реалізації запропонованого способу із врахуванням складу та різних характеристик димових газів цементного виробництва розроблено багатосопловий пристрій 2 для охолодження димових газів (базується на принципі роботи сопла Лавалє) та газорідинний сепаратор 5.

Для відділення краплин конденсату із димових газів можна застосувати різноманітне обладнання, зокрема і газорідинні сепаратори, але при їх проектуванні необхідно звертати увагу на склад газу, технологічні параметри тощо.

Для відділення краплинної рідини від газового потоку застосовують різноманітні конструкції газорідинних сепараторів. Найбільше поширення сепаратори отримали у таких галузях промисловості: нафтогазова, хімічна, цементна, харчова, будівельна тощо. Застосування сепараторів підвищує ефективність процесу, якість продукції та безпеку.

Робота сепараторів базується на різних методах: інерційному ударі, гравітації, центрифугуванні або електростатичних силах, щоб відокремити краплі рідини від потоку газу завдяки різниці густин чи розмірах між фазами.

Донедавна нові конструкції сепараційного обладнання розробляли на основі практичного досвіду попередніх дослідників, а також користуючись спрощеними математичними моделями. Звичайно, такий підхід вимагав значних фізичних та економічних затрат та дуже часто не давав бажаного результату. В сучасних умовах розвитку комп'ютерної техніки вирішення складних актуальних задач неможливо уявити без використання програмних комплексів, які дають можливість моделювати той або інший процес в апараті, вивчення якого є надзвичайно трудомісткою задачею. Широкого застосування під час розроблення сепараційного обладнання отримали програми, що реалізують метод скінченних елементів. Однією з таких програм є модуль програми SolidWorks – Flow Simulation. Проте, теоретичні дослідження роботи сепараційного обладнання за допомогою Flow Simulation зводяться не лише до аналізу руху газового потоку з твердою фазою в робочій зоні апарату та розрахунку на основі одержаних даних оптимальних геометричних розмірів, але й визначення основних технологічних характеристик роботи дослідного зразка – ефективності вловлювання частинок різних розмірів та гідравлічного опору [12].

Аналіз та узагальнення результатів теоретичних експериментів, які одержані для різних конструктивних та режимних параметрів роботи обладнання, дають підставу зробити висновок про те, що використання модуля Flow Simulation дозволяє: попередньо оцінити енергетичні затрати на процес очищення запиленого газу; проаналізувати траєкторію руху закрученого газового потоку в апараті та розробити практичні рекомендації при

розробці нового та модернізації існуючого сепарційного обладнання; дозволяє значно скоротити час та затрати на розробку, проектування та експериментальні дослідження різноманітного сепарційного обладнання [12].

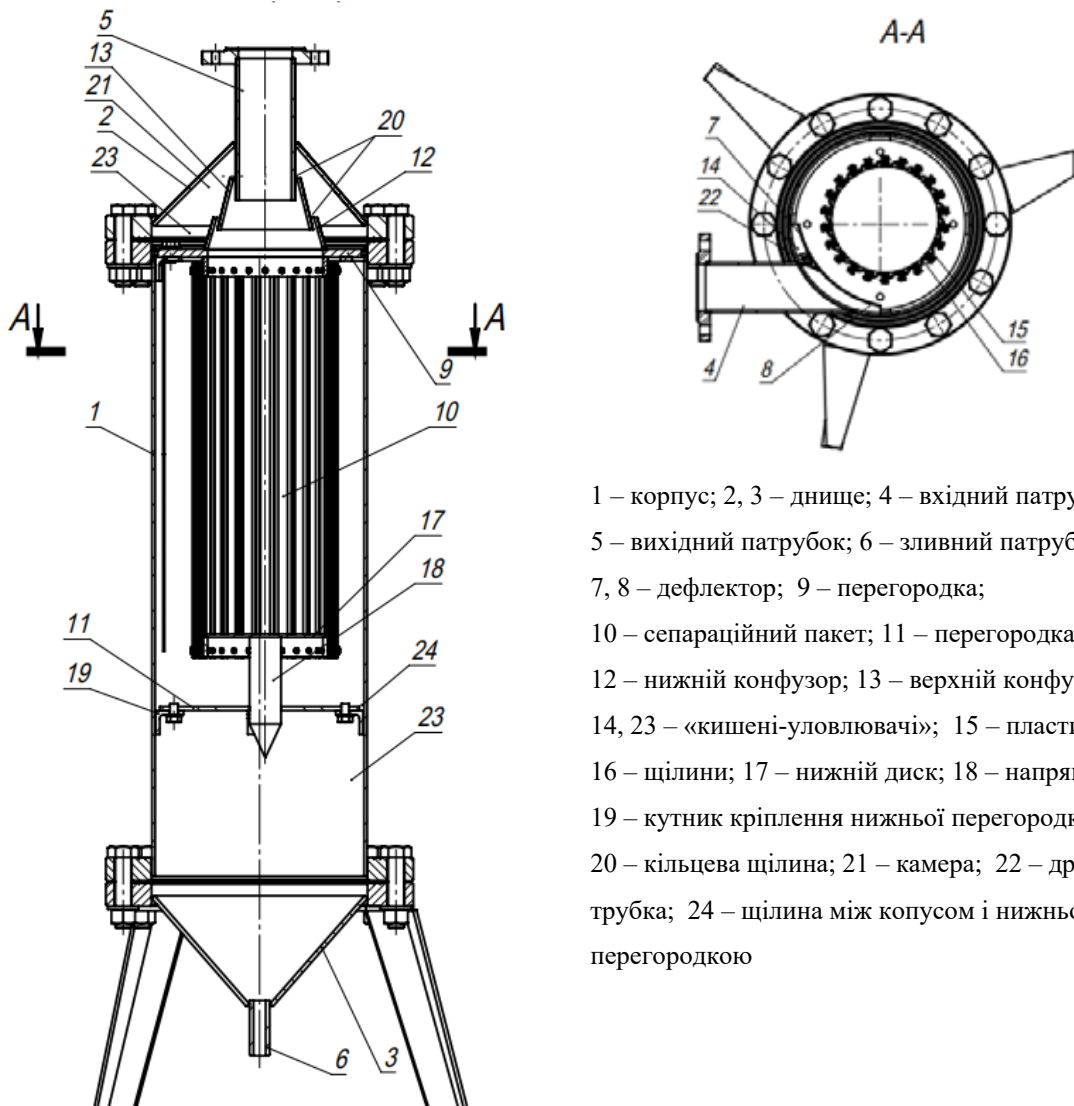
#### Формулювання мети дослідження

Метою роботи є імітаційне моделювання та експериментальні дослідження роботи газорідинного сепаратора для відокремлення конденсату водяної пари з димових газів цементного виробництва.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Для виділення рідини із димових газів цементного виробництва пропонується багатоступенева система уловлювання, що реалізована у пропонованому газорідинному сепараторі, конструкція якого показана на рисунку 2.

Опишемо принцип роботи сепаратора. Газорідинна суміш потрапляє до вхідного патрубку 4, і входячи у корпус сепаратора 1, змінює свій напрямок за рахунок дефлектора 7. При цьому відбувається закручування газорідинного потоку та його тангенційний рух внутрішньою поверхнею корпусу 1.



- 1 – корпус; 2, 3 – днище; 4 – вхідний патрубок, 5 – вихідний патрубок; 6 – зливний патрубок; 7, 8 – дефлектор; 9 – перегородка; 10 – сепарційний пакет; 11 – перегородка нижня; 12 – нижній конфузор; 13 – верхній конфузор; 14, 23 – «кишені-уловлювачі»; 15 – пластини; 16 – щілини; 17 – нижній диск; 18 – напрямна вісь; 19 – кутник кріплення нижньої перегородки; 20 – кільцева щілина; 21 – камера; 22 – дренажна трубка; 24 – щілина між копусом і нижньою перегородкою

Рис. 2. Схема пропонованої конструкції газорідинного сепаратора

За рахунок зміни напряму руху та дії відцентрової сили, краплини рідини коагулюються та відділяються від газового потоку. Частина рідини, що відділилась, продовжує рухатись тангенційно і стікає у днище 3 сепаратора. Для відбору рідини, що рухається тангенційно, передбачено дефлектор 8. Рідина у цьому дефлекторі зупиняється, коагулюється та під дією сили тяжіння стікає у днище 3. При цьому газ, який знаходиться ближче до центра осі сепаратора, проходить у щілини 16, утворені пластинами 15. На цих пластинах осідають краплини рідини, які не були відділені на попередньому етапі. Ці краплини із пластин 15 стікають вниз і потрапляють на поверхню нижньої перегородки 11, і далі, рухаючись крізь щілину 23, стікає у днище 3.

Легка рідинна плівка, що залишилася у кишени-уловлювачі 23, надходить разом з потоком суміші в зону вихідних конфузурів 12 і 13. Рухаючись у висхідному газовому потоці поверхнею конфузурів 12 і 13, рідина потрапляє в щілини 20, звідки осідає у верхній накопичувальній камері 21, з якої під дією гравітаційних сил відводиться дренажною трубою 22 у нижню частину корпусу 1 сепаратора і потрапляє у днище 3. Очищений від рідини газ відводиться із сепаратора через вихідний патрубок 5, а зібрана на усіх ступенях рідина з днища 3 сепаратора відбирається через зливний патрубок 6.

Для дослідження запропонованої конструкції газорідинного сепаратора з врахуванням властивостей газорідинної суміші, визначення ефективності сепаратора за різних технологічних параметрів тощо, розроблено його тривимірну модель у програмі SolidWorks.

Сітка скінченних елементів газорідинного сепаратора має певні особливості (рис. 3). У програмі FlowSimulation можливі такі варіанти побудови сітки: глобальна та локальна. Необхідно звернути увагу, що у конструкції сепаратора наявні щілини малих розмірів. При застосуванні глобальної сітки вони або не враховуватимуться, або отримані результати не матимуть достатньої точності. Тому для таких елементів застосовано індивідуальний підхід із використанням локальної сітки з відповідними її налаштуваннями.

На вихідному патрубку сепаратора задано об'ємну витрату газової суміші величиною  $0,12 \text{ м}^3/\text{с}$  (рис. 4). Швидкість на всіх стінках сепаратора рівна нулю. На вхідному патрубку сепаратора задано тиск величиною  $124838 \text{ Па}$ . Такі величини тиску та витрати газової суміші обумовлені технологічною схемою сепарації газу на виробництві, де досліджуватиметься сепаратор.

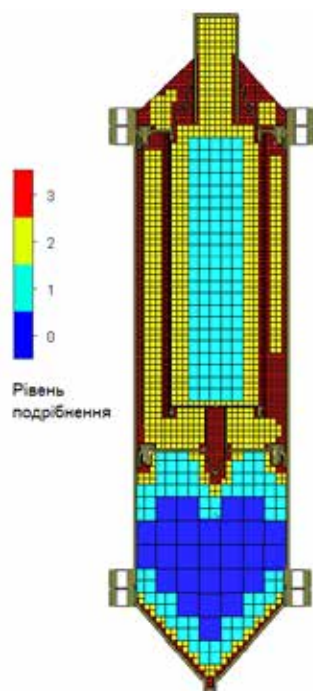


Рис. 3. Сітка скінченних елементів

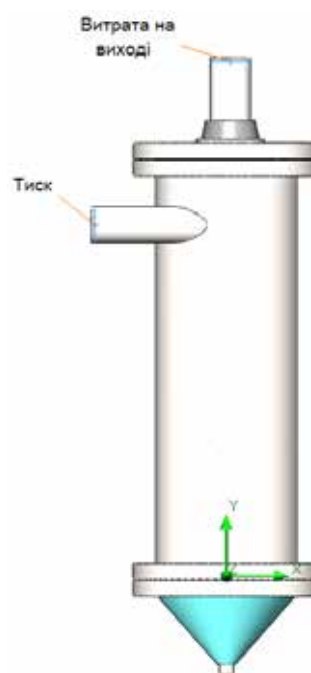


Рис. 4. Граничні умови

Оскільки газовий потік є багатокомпонентним, тобто складається із різних газів, то їхня масова концентрація також врахована під час імітаційного моделювання. Склад газової суміші при виробництві цементу: азот – 28%; вода – 11%; вуглекислий газ – 22%; кисень – 9%; повітря – 30% [9].

Для контролю параметрів сепаратора вибрано декілька його перерізів: поздовжній та поперечний по осі вхідного патрубка (аналогічно, як зображено на рисунку 2).

Оскільки основне призначення розгляданого сепаратора – очищення газового потоку від краплинної рідини, то для визначення ефективності сепарації у програмі FlowSimulation використано модуль «Particle Studies». У цьому модулі задано такі фракції краплин рідини (води):  $0,01\text{--}0,1 \text{ мм}$  з кроком  $0,01 \text{ мм}$ . Також у налаштуваннях задано напрям дії сил гравітації та витрату краплинної рідини  $0,00236 \text{ кг/с}$ .

Під час виведення результатів імітаційного моделювання роботи сепаратора необхідно зауважити, що можливо розглядати два варіанти значень контрольованих параметрів: глобальний максимум та локальний максимум. Мається на увазі, що коли виводяться результати у поперечному перерізі по осі сепаратора, то при виборі параметра «глобальний максимум» максимальне значення контрольованого параметру може знаходитись у іншій точці (частині) сепаратора. Тому для контролю параметрів у вибраних поперечних перерізах сепаратора слід

застосовувати параметр «локальний максимум» за якого максимальне значення параметру знаходиться у розглядуваному перерізі.

На рисунку 5 показано розподіл тиску та швидкості у поздовжньому перерізі сепаратора.

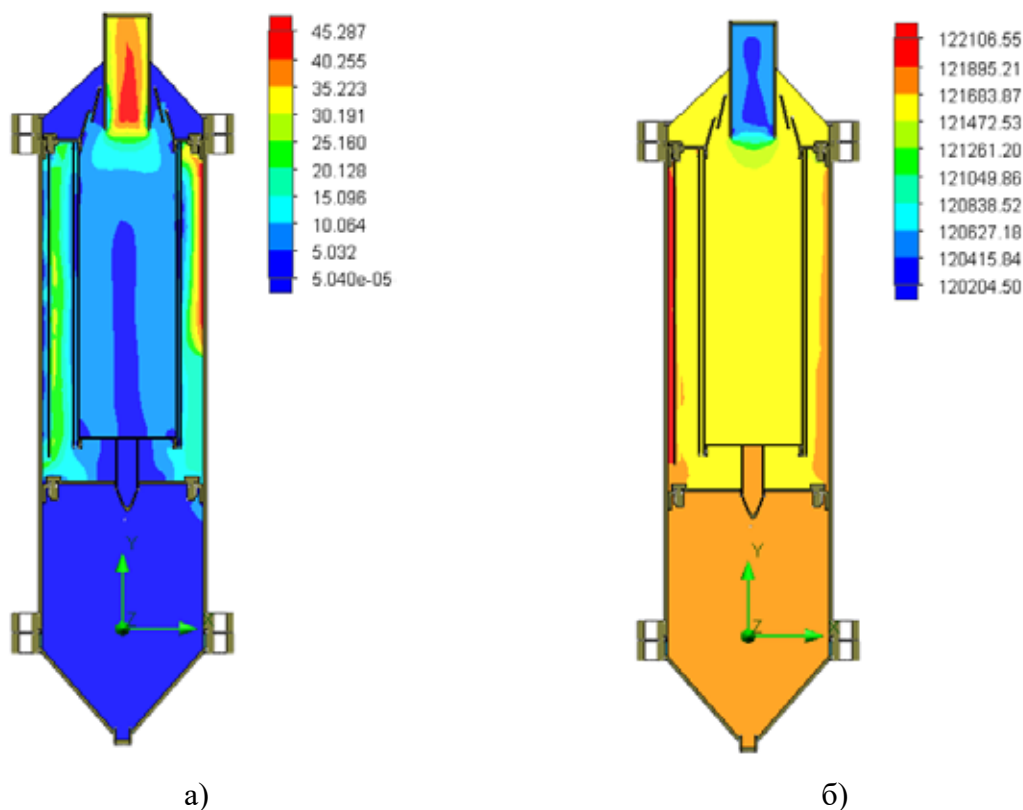


Рис. 5. Розподіл швидкості (м/с) (а) та тиску (Па) (б) у поздовжньому перерізі сепаратора

Нижче на рисунку 6 наведено розподіли тиску та швидкості у поперечному перерізі вздовж осі вхідного патрубка сепаратора.

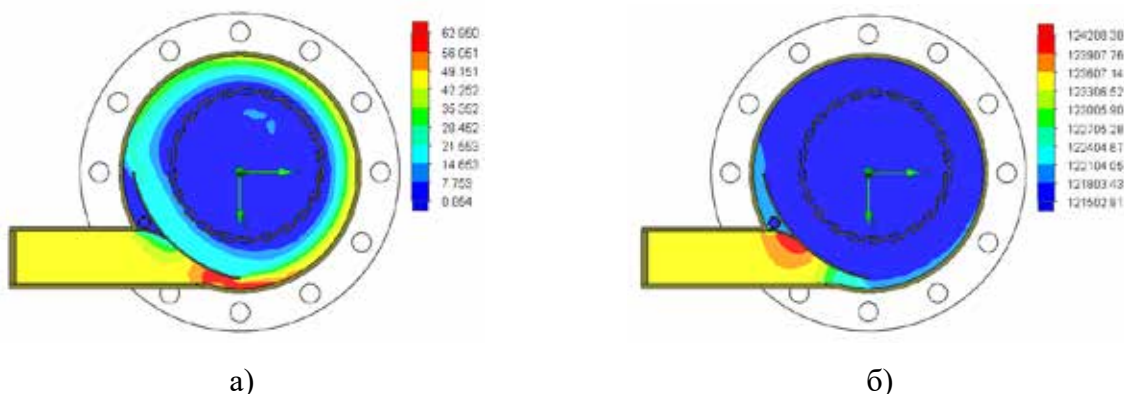


Рис. 6. Розподіл швидкості (м/с) (а) та тиску (Па) (б) у поперечному перерізі сепаратора вздовж осі вхідного патрубка сепаратора

Отже, виходячи з результатів імітаційного моделювання, в середньому кількість частинок рідини, яка виходить разом з газовим потоком із сепаратора, складає 2%. Тобто, 98% рідини сепарується із газорідинної суміші за допомогою розробленого сепаратора.

Для проведення експериментальних досліджень розробленої та виготовленої конструкції сепаратора його було під'єднано до джерела димових газів цементного виробництва (рис. 7).



- 1 – вхідний патрубок;
- 2 – багатосопловий пристрій;
- 3 – буферна камера;
- 4 – сепаратор;
- 5 – вихідний патрубок

**Рис. 7. Установа для очищення димових газів цементного виробництва від водяної пари, пилу та механічних домішок**

Неочищений газовий потік надходив через вхідний патрубок 1. Далі – проходячи багатосопловий пристрій 2 він охолоджувався та поступав у буферну камеру 3, а звідти – на сепаратор 4, з якого викидався у навколишнє середовище через вихідний патрубок 5.

У ході проведення експериментальних досліджень сепаратора відділено з газового потоку 8,3 л/год рідини, а у очищеному газовому потоці залишилось 0,25 л/год. Виявленні залишки вологи можна відбирати, використовуючи другу ступінь сепарації або адсорбер.

Порівнявши отримані результати імітаційного моделювання та експериментальних досліджень, встановлено незначну розбіжність між ними.

#### Висновки

Існуючі технології та обладнання для відокремлення рідини із газового потоку на даний час є надзвичайно енерговитратними. Пропонований спосіб відділення краплинної рідини із газового потоку дозволяє як мінімізувати енерговитрати, так і зменшити габаритні розміри та спростити конструкцію використовуваного обладнання. Обладнання, що використовується у пропонованому способі, є компактним, не потребує частого обслуговування та спеціально підготовленого персоналу.

Проведене імітаційне моделювання роботи пропонованої конструкції газорідинного сепаратора із врахуванням як умов роботи (тиску, температури) так і складу димового газу, дозволило встановити, що 98% рідини сепарується із газорідинної суміші розробленим сепаратором.

Проведені експериментальні дослідження виготовленого сепаратора на цементному виробництві на відібраному димовому газі підтвердили результати імітаційного моделювання його роботи. Із димового газу було відібрано 8,3 л/год рідини, а у очищеному газовому потоці залишилось 0,25 л/год.

#### Список використаної літератури

1. Глобальний цемент і навколишнє середовище: огляд, European Cement Research Academy. (2017). URL: [http://www.cement-tech.info/en/info-detail/news/cement-industry-and-the-environment/global-cement-and-the-environment-an-overview\\_59787/](http://www.cement-tech.info/en/info-detail/news/cement-industry-and-the-environment/global-cement-and-the-environment-an-overview_59787/)
2. Цементна промисловість та її вплив на навколишнє середовище: огляд. (2021). URL: [https://www.researchgate.net/publication/349506035\\_Cement\\_Industry\\_and\\_its\\_Environmental\\_Impacts\\_An\\_Overview](https://www.researchgate.net/publication/349506035_Cement_Industry_and_its_Environmental_Impacts_An_Overview)
3. «Ініціатива сталого розвитку цементу: глобальний підхід до сталого виробництва цементу». Глобальна асоціація цементу та бетону, 2023 р. URL: <https://www.worldcement.com/issues/the-cement-sustainability-initiative>
4. «Стійке виробництво цементу». Європейська комісія, 2023. URL: [https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/cement-production\\_en](https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/cement-production_en)
5. «Горизонт 2020 – Сталі цементні процеси». Європейський Союз, 2023. URL: [https://ec.europa.eu/research/partner-alert/project/grant-agreement-Horizon-2020-SC3-Sustainable-Cement-Processes\\_699283](https://ec.europa.eu/research/partner-alert/project/grant-agreement-Horizon-2020-SC3-Sustainable-Cement-Processes_699283)
6. «CCUS в цементі: уловлювання та використання CO<sub>2</sub>». Компанія XYZ, 2023 р. URL: [https://companyxyz.com/ccus-in-cement-capturing-and-utilizing-CO<sub>2</sub>](https://companyxyz.com/ccus-in-cement-capturing-and-utilizing-CO2)

7. «Впровадження CCUS для Cement Industries». ARCADIS, 2023. URL: <https://www.arcadis.com/global/en/knowledge/implementation-ccus-for-cement-industries.aspx>
8. «Технології уловлювання, утилізації та зберігання вуглецю». Енергетична освіта, 2023. URL: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Carbon\\_Capture\\_Utilization\\_and\\_Storage\\_Technologies](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Carbon_Capture_Utilization_and_Storage_Technologies)
9. Плашихін С. В. 9. Довідник з ресурсоефективного та чистого виробництва. цементна промисловість. Київ: Центр ресурсоефективного та чистого виробництва, 2020. 96 с.
10. Михайлюк В. В. Лабораторно-експериментальна установка для отримання конденсату димових газів та його утилізація. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. № 3 (279) 2023. С. 16-24.
11. Спосіб виділення рідини і механічних частинок з газового потоку: пат. 152837 Україна: В03С 3/02. № 202200306; заявл. 25.01.22, опубл. 19.04.23, Бюл. № 16. 4 с.
12. Майструк В.В. Оцінка енергозатрат при роботі прямотечійного циклону за допомогою програмного пакету FLOW SIMULATION / В.В. Майструк, Р.І. Гаврилів, А.С. Попіль, А.М. Басистий. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харків. 2012. Вип. 6/8(60). С. 28-30.

### References

1. Globalnyi tsement i navkolyshnie seredovyshe: ohliad, European Cement Research Academy. (2017). Retrived from [http://www.cement-tech.info/en/info-detail/news/cement-industry-and-the-environment/global-cement-and-the-environment-an-overview\\_59787/](http://www.cement-tech.info/en/info-detail/news/cement-industry-and-the-environment/global-cement-and-the-environment-an-overview_59787/)
2. Tsementna promyslovist ta yii vplyv na navkolyshnie seredovyshe: ohliad. (2021). Retrived from [https://www.researchgate.net/publication/349506035\\_Cement\\_Industry\\_and\\_its\\_Environmental\\_Impacts\\_An\\_Overview](https://www.researchgate.net/publication/349506035_Cement_Industry_and_its_Environmental_Impacts_An_Overview)
3. Initsiatyva staloho rozvytku tsementu: hlobalnyi pidkhid do staloho vyrobnytstva tsementu. (2023) Retrived from <https://www.worldcement.com/issues/the-cement-sustainability-initiative>
4. Stiike vyrobnytstvo tsementu. (2023). Retrived from [https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/cement-production\\_en](https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/cement-production_en)
5. Horyzont 2020 – Stali tsementni protsesy. (2023). Retrived from [https://ec.europa.eu/research/partner-alert/project/grant-agreement-Horizon-2020-SC3-Sustainable-Cement-Processes\\_699283](https://ec.europa.eu/research/partner-alert/project/grant-agreement-Horizon-2020-SC3-Sustainable-Cement-Processes_699283)
6. CCUS v tsementi: ulovliuvannya ta vykorystannya CO<sub>2</sub>. Kompaniia XYZ. (2023) Retrived from <https://companyxyz.com/ccus-in-cement-capturing-and-utilizing-CO2>
7. Vprovadzhenia CCUS dlia Cement Industries. ARCADIS. (2023). Retrived from <https://www.arcadis.com/global/en/knowledge/implementation-ccus-for-cement-industries.aspx>
8. Tekhnolohii ulovliuvannya, utylizatsii ta zberihannya vuhletsiiu. Enerhetychna osvita. (2023). Retrived from [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Carbon\\_Capture\\_Utilization\\_and\\_Storage\\_Technologies](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Carbon_Capture_Utilization_and_Storage_Technologies)
9. Plashykhin, S. V. (2020). *Dovidnyk z resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva. tsementna promyslovist*. Kyiv: Tsentr resursoefektyvnoho ta chystoho vyrobnytstva.
10. Mykhailiuk, V.V., (2023). Laboratorno-eksperymentalna ustanovka dlia otrymannya kondensatu dymovykh haziv ta yoho utylizatsiia. *Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia*. 3(279), 16-24.
11. Patent na korysnu model № 152837, Ukraina, V03S 3/02. Sposib vydilennia ridyny i mekhanichnykh chastynok z hazovoho potoku // Kryzhanivskiy Ye.I. (UA); Liakh M. M. (UA); Mykhailiuk V. V. (UA); Makoviichuk M.V. (UA); Kuchirka Yu.M. (UA); Vytrykhovskiy Ye.A. (UA) u202200306; Zaiavl. 25.01.2022; Opubl. 19.04.2023, Biul. № 16. 4 s.
12. Maistruk, V.V., Havryliv R.I., Popil, A.S., Basisty A.M. (2012). Otsinka enerhozatat pry roboti priamotechiinoho tsyklonu za dopomohoiu prohramnoho paketu FLOW SIMULATION. *Vostochno-Evropeiskiy zhurnal peredovykh tekhnolohiy*. 6/8(60), 28-30.

**A. V. PLIASOVSKA**

Student at the Department of Electrochemical Productions Technology  
National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
ORCID: 0009-0002-4063-4246

**D. YU. USHCHAPOVSKYI**

PhD in Technical Sciences,  
Associate Professor at the Department of Electrochemical Productions Technology  
National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
ORCID: 0000-0002-2809-2774

**V. I. VOROBYOVA**

Doctor in Technical Sciences,  
Head of the Department of Physical Chemistry Technology  
National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
ORCID: 0000-0001-7479-9140

**G. S. VASYLIEV**

Doctor in Technical Sciences,  
Associate Professor at the Department of Electrochemical Productions Technology  
National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
ORCID: 0000-0003-4056-5551

**O. V. LINYUCHEVA**

Doctor in Technical Sciences,  
Dean of the Chemical Technology Faculty  
National Technical University of Ukraine  
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
ORCID: 0000-0003-4181-5946

## PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF METALLIC PARTS ELECTROCHEMICALLY PRINTED USING COPPER NITRATE ELECTROLYTE

*The process of electrochemical 3D printing of copper parts using a concentrated copper nitrate electrolyte has been investigated. It was established that in a nitrate copper plating electrolyte with a copper nitrate concentration of 500 g/l, it is possible to obtain locally electrodeposited metal parts with a compact fine-crystalline structure and an average profile height of 150 μm. The working current densities of electrochemical printing in this case were 2.45...2.7 A/dm<sup>2</sup>. It has been shown that reducing the speed of movement of the working electrode (anode) leads to an improvement in the uniformity of metal deposition along the entire trajectory of movement and the reduction of the crystals size of the metal deposit. This is obviously a consequence of a change in the current mode of electrodeposition.*

*It was established that on the surface with initial parameters of microroughness ( $Rz(1)=1.128$   $Ra(1)=0.2925$ ) during electrochemical 3D printing, a metal structure with roughness parameters –  $Rz(1)=95.72$   $Ra(1)=16.32$  has been formed. The formation of a compact but at the same time a highly rough metal structure makes the application of the electrochemical 3D printing method promising in the production technology of printed circuit boards and in the field of microelectronics as a whole.*

*The micromechanical tests of samples of electrochemically printed copper deposits showed the following. The microhardness of the electrochemically printed copper deposit is approximately 30% higher, but the plasticity coefficient and Young's modulus acquire values close to the corresponding parameters of hydrometallurgical copper. This indicates that the method of obtaining metal objects by electrochemical 3D printing does not contribute to a significant deterioration of the elasticity of the obtained material.*

**Key words:** copper deposits, electrochemical 3D printing, nitrate electrolyte, microhardness, Young's modulus, coefficient of plasticity.

А. В. ПЛЯСОВСЬКА

студентка кафедри технології електрохімічних виробництв  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: 0009-0002-4063-4246

Д. Ю. УЩАПОВСЬКИЙ

кандидат технічних наук,  
доцент кафедри технології електрохімічних виробництв  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: 0000-0002-2809-2774

В. І. ВОРОБІЙОВА

доктор технічних наук,  
завідувач кафедри фізичної хімії  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: 0000-0001-7479-9140

Г. С. ВАСИЛЬЄВ

доктор технічних наук,  
доцент кафедри технології електрохімічних виробництв  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: 0000-0003-4056-5551

О. В. ЛІНЮЧЕВА

доктор технічних наук,  
декан хіміко-технологічний факультету  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: 0000-0003-4181-5946

## ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОХІМІЧНО НАДРУКОВАНИХ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НІТРАТНОГО ЕЛЕКТРОЛІТУ МІДНЕННЯ МЕТАЛІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

*Досліджено процес електрохімічного 3D-друку мідних об'єктів із застосуванням концентрованого нітратного електроліту міднення. Встановлено, що в нітратному електроліті міднення з концентрацією нітрату міді 500 г/л є можливим отриманням локально електроосаджених металічних виробів із компактною дрібнокристалічною структурою та середньою висотою профілю 150 мкм. Робочі густини струму електрохімічного друку при цьому становлять 2,45...2,7 А/дм<sup>2</sup>. Показано, що зменшення швидкості руху робочого електрода анода призводить до поліпшення рівномірності осадження металу по всій траєкторії руху та подрібненню кристалічної структури металевого осаду. Це, очевидно є наслідком видозміни струмового режиму електроосадження.*

*Встановлено, що на поверхні з початковими параметрами мікрошорсткості ( $Rz(1)=1,128$ ;  $Ra(1)=0,2925$ ) при електрохімічному 3D-друці формується металічна структура із параметрами шорсткості –  $Rz(1)=95,72$ ;  $Ra(1)=16,32$ . Формування компактної проте водночас шорсткої поверхні металевої структури робить перспективним застосування методу електрохімічного 3D-друку в технології виробництва плат друкованого монтажу та й в галузі мікроелектроніки в цілому.*

*Проведені мікромеханічні випробування зразків електрохімічно надрукованих осадів міді показали наступне. Мікротвердість електрохімічно надрукованого осаду міді є приблизно на 30% вищою, проте коефіцієнт пластичності та модуль Юнга набувають значень, близьких до відповідних параметрів гідрометалургійної міді. Це свідчить про те, що спосіб отримання металічних об'єктів електрохімічним 3D-друком не сприяє значному погіршенню еластичності отриманого матеріалу.*

**Ключові слова:** мідні осад, електрохімічний 3D-друк, нітратний електроліт, мікротвердість, модуль Юнга, коефіцієнт пластичності.



**Formulation of the problem**

Prospects for the use of copper nitrate electrolyte in the field of electrochemical 3D printing are its high performance and low throwing power, which can provide higher printing accuracy and precision of the obtained metal structures [1]. Among the main problems that may appear when using nitrate electrolytes is the control of the morphology of the electrodeposited structures, since there is a high tendency to the formation of coarse-crystalline dendrite-like deposits, which can be controlled by introducing special additives [2]. It is also important to optimize electrolysis parameters in order to achieve the necessary physical-mechanical and electrical properties of the obtained metal parts.

**Analysis of the latest research and publications**

In works [3,4] it was shown the possibility of obtaining metal products with a compact fine-crystalline structure and high physical and mechanical properties by the method of electrochemical 3D printing using copper sulfate electrolyte. Initial experiments using nitrate copper electrolyte [5] showed the possibility of obtaining compact electrochemically printed metal deposits with a profile height of up to 100 μm.

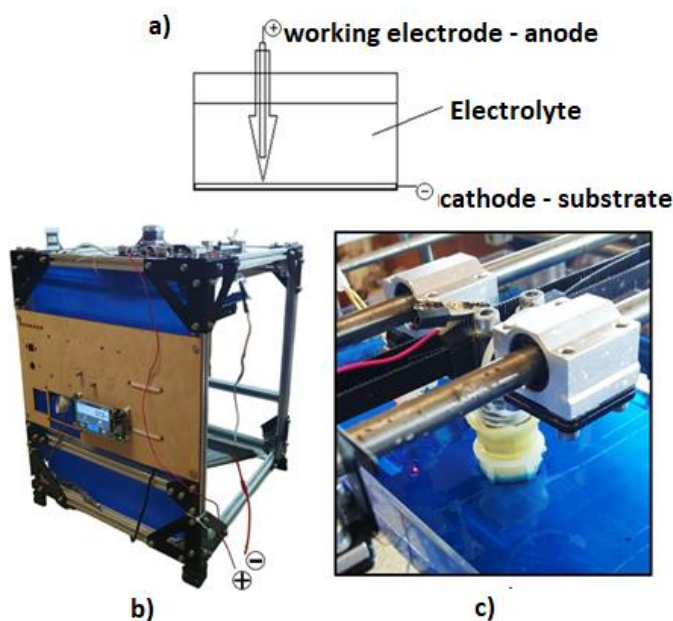
**Formulation of the purpose of the research**

Thus, the purpose of this work is to investigate the possibility of using a concentrated highly productive nitrate electrolyte in electrochemical 3D printing systems and to determine the physical and mechanical properties of electrochemically printed copper parts.

**Presentation of the main research material**

**Research methodology.** The process of electrochemical 3D printing was carried out in an electrochemical cell (Fig. 1). A cathode in the form of a plate made of AISI 321 stainless steel or M0 hydrometallurgical copper with a thickness of 3 mm was placed at the bottom of the plastic cell. Stainless steel was used when it was necessary to separate the printed element from the base after printing. The working electrode (anode) was a cylinder made of platinum-plated titanium foil, which was located in a plastic dielectric case, with the purpose of focusing the electric field in the appropriate place under the working electrode. This ensures precision metal deposition or electrochemical printing. Before conducting the experiment, an electrolyte solution with a volume of 1 L was poured into the cell, the level of the electrolyte was 20 mm above the cathode. The electrochemical cell was placed in the upper part of the 3D printer. In all experiments, the distance between the edge of the dielectric case of the anode and the surface of the cathode of the substrate was 1 mm [3-5].

The investigation of the electrochemical 3D printing process of copper parts was carried out using a nitrate electrolyte with a copper (II) nitrate concentration of 500 g/l. In this study, similar to [3-5], “square” type objects with a side length of 1.9 cm were printed. The estimated height of the printed object was 200 μm. The movement of the working electrode along the appropriate trajectory was provided by a specially developed Travis 3D printer program. After deposition, the current was turned off, the solution was drained from the vessel. The printed object was washed with distilled water and dried with warm air.

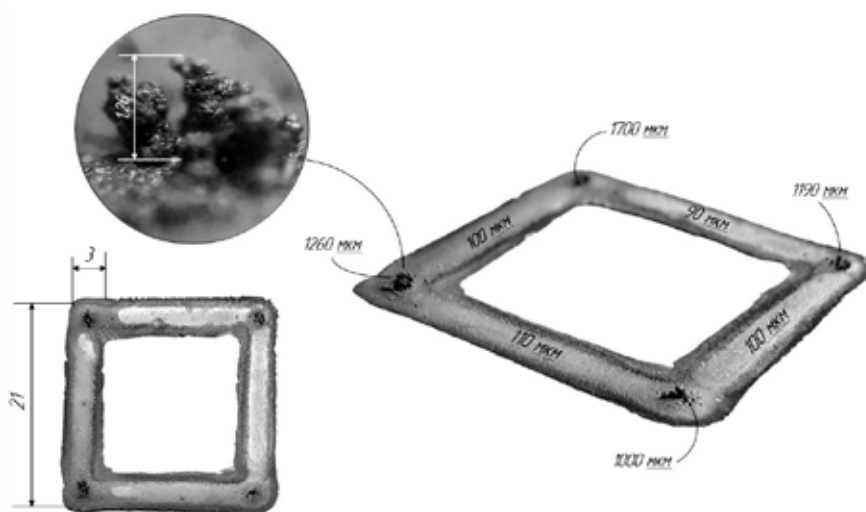


**Fig. 1. Photo of the electrochemical 3D printing installation: a) schematic image of the electrochemical cell; b) electrochemical 3D printer; c) electrochemical cell and working electrode of an electrochemical 3D printer**

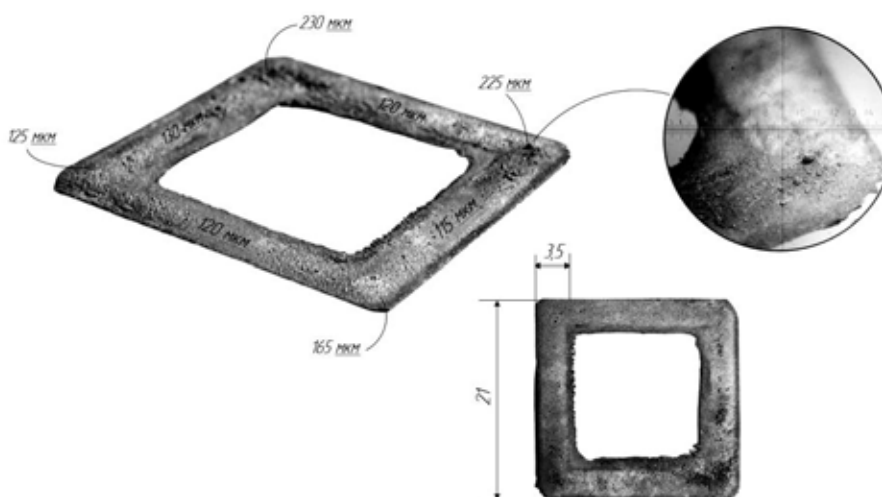
Micromechanical tests of printed objects were carried out on the universal microhardness-scratch tester “Micron-gamma” by the method of continuous pressing of the indenter. The load on the Berkovich indenter is carried out by a linear non-contact electromagnetic loader with a maximum force of 50 N [4, 6, 7]. In order to determine the micromechanical characteristics, the electrochemical 3D printing of the studied objects was carried out on a copper base made of M0 hydro-electrometallurgical copper, which served as a reference sample.

The microrelief of the surface was studied on a non-contact interference profilometer “Micron-alpha”. This approach makes it possible to register the topography of the surface by processing a sequence of interference data (pictures) under partially coherent illumination, which are recorded by a digital camera during the displacement of the reference (reference) mirror [8].

**Results and their discussion.** Electrochemical 3D printing of the “square” objects under study was carried out with a linear speed of movement along a given trajectory of 1.5 cm/s and 3 cm/s, the average height of the obtained objects is 150 μm. Images of the obtained objects are shown in Fig. 2, 3, and the morphology of their cathodic deposits is shown in Fig. 4.



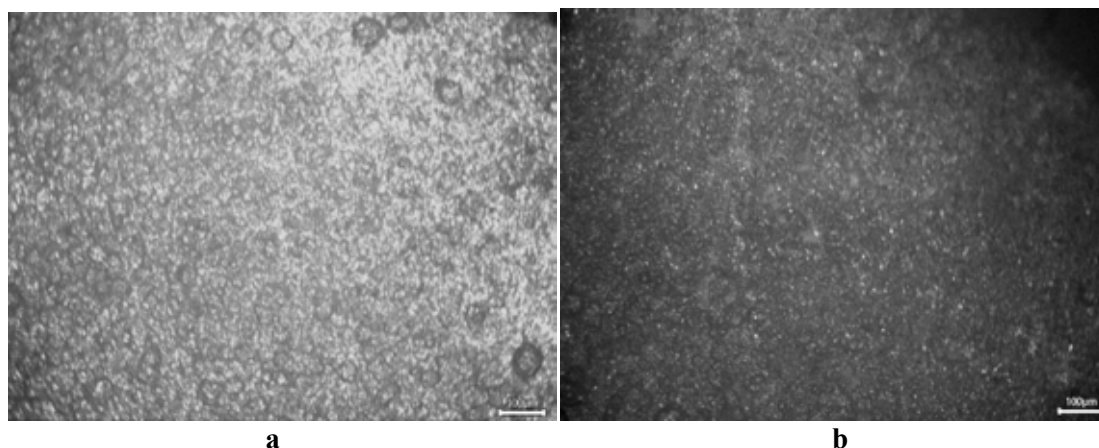
**Fig. 2. Electrochemically printed “square” part with an anode movement speed of 3 cm/s.  
The average current density during printing is 2.7 A/dm<sup>2</sup>**



**Fig. 3. Electrochemically printed “square” part with an anode movement speed of 1.5 cm/s.  
The average current density during printing was 2.45 A/dm<sup>2</sup>**

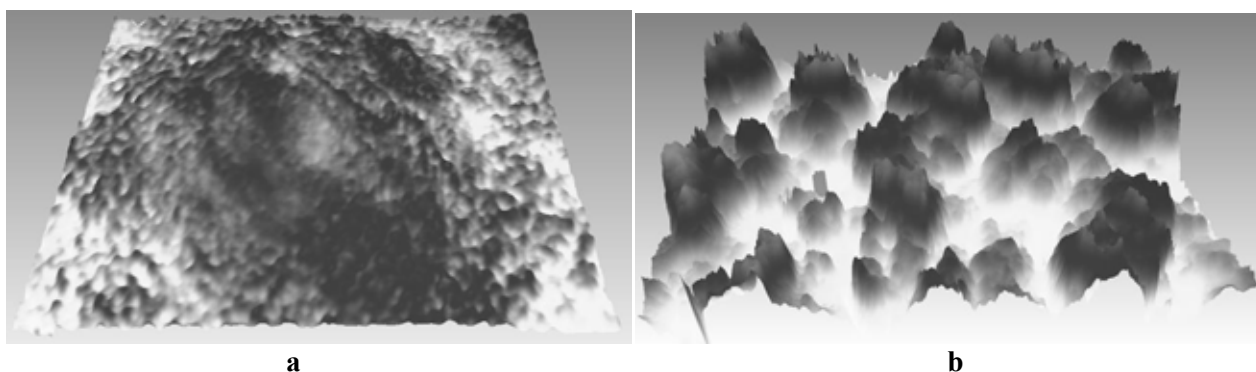
Conducted studies of electrochemical 3D printing of “square” parts indicated the following. Parts with a fine-crystalline compact metal structure were obtained. However, it was found that excessive metal deposition is observed in the corners (Fig. 2, 3). This phenomenon is related to the peculiarities of the movement of the working electrode, in particular

with the deceleration when passing the corner. A decrease in the speed of movement, which is also accompanied by an increase in its uniformity, causes a decrease in the manifestation of excessive deposition and the removal of dendrites from the corresponding places on the received object. Also, as can be seen from Fig. 4, a decrease in the speed of movement leads to the formation of a finer crystalline structure of the surface of the metal deposit and the elimination of spherulites. This, in particular, may be associated with a change in the current regime, in particular with a decrease in the frequency of pulses and current pauses.



**Fig. 4. Morphology of electrochemically printed copper parts, speed of anode movement, cm/s: a – 3; b – 1.5**

3D relief modelling and determination of the surface roughness of the obtained electrochemically printed samples on a copper substrate are shown in Fig. 5.

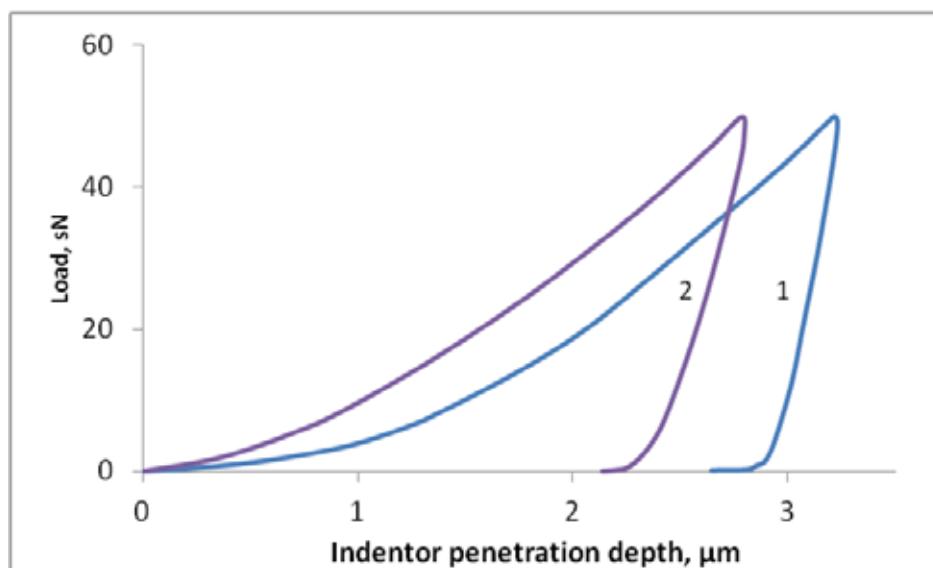


**Fig. 5. 3D models of the surface of the hydrometallurgical copper base (a) and a fragment of the electrochemically printed copper deposit (b)**

As can be seen from Fig. 5. during electrochemical 3D printing, a deposit with a columnar structure is formed. The roughness of the surface of the sample of hydroelectrometallurgical copper base has the following parameters:  $Rz(1)=1.128$ ;  $Ra(1)=0.2925$ . For the electrochemically printed sample:  $Rz(1)=95.72$ ;  $Ra(1)=16.32$ . Considering the possible application of the investigated production method, the formation of a compact and, at the same time, rough metal structure is beneficial. In particular, the adhesive properties of the conductive pattern obtained by electrochemical 3D printing will be improved at the stage of its installation on the dielectric base according to the technology of printed circuit board production by the “transfer” method. Also, due to the increase in the specific surface area of the metal conductor, heat transfer can be improved.

The next stage of the research was the comparison of the micromechanical characteristics of the electrochemically printed copper deposit with the industrial material – hydroelectrometallurgical copper. Diagrams of the indentation of the Berkovich indenter for both studied materials are shown in Fig. 6.

The obtained appearance of the indentation diagrams reflects the influence of the method of obtaining on the physical and mechanical properties of the studied copper samples. Accordingly, the maximum average value of the indenter insertion depth for hydroelectrometallurgical copper is  $3.2\ \mu\text{m}$ , and for electrochemically printed copper –  $2.8\ \mu\text{m}$ .



**Fig. 6. Indentation diagram of hydroelectrometallurgical copper sample (1) and for electrochemically printed copper deposit from nitrate electrolyte (2)**

On the basis of the obtained implementation diagrams, the Meier microhardness, Young’s modulus, and plasticity coefficients for the studied copper samples were calculated and averaged, which are given in Table 1.

Table 1

**Micromechanical parameters of the studied copper samples**

Hydro-electrometallurgical copper			Electrochemically printed copper deposit from nitrate electrolyte		
HM, GPa	E, GPa	$K_{elast}$	HM, GPa	E, GPa	$K_{elast}$
2,16	114,4	0,918	3,20	98,9	0,880

As can be seen from Table 1, the microhardness of the electrochemically printed copper deposit is approximately 30% higher than that of hydroelectrometallurgical copper, which is associated with the formation of a pronounced columnar structure of the deposit (Fig. 5.a). However, plasticity coefficients and Young’s modulus of both electrochemically printed and hydrometallurgical copper samples are close in value. Thus, the method of obtaining metal objects by electrochemical 3D printing does not contribute to a significant deterioration of the elasticity of the obtained material.

**Conclusions**

The possibility of obtaining copper metal parts using the electrochemical 3D printing method with a compact fine-crystalline structure using nitrate copper electrolyte has been shown.

It has been shown that a decrease in the speed of movement of the working electrode leads to an increase in the uniformity of the metal deposit, but the precision of printing decreases.

It was established that in terms of plasticity coefficient, electrochemically printed copper deposits in nitrate electrolyte are close to hydroelectrometallurgical copper. The formation of a compact copper deposit with a rough surface is a positive characteristic from the point of view of the use of electrochemical 3D printing in the production technology of printed circuit boards.

**Bibliography**

1. Kunieda M., Katoh R., Mori Y. Rapid prototyping by selective electrodeposition using electrolyte jet. *CIRP Annals*, № 47(1), 1998, pp. 161–164.
2. Правда А.А., Радченкова А.П., Ларін В.І. Вплив гліцину на процес електроосадження міді з нітратного електроліту. *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна № 820. Сер. : Хімія*, № 16(39), 2008, С. 353–356. <https://ekhnuir.karazin.ua/handle/123456789/3876>
3. Babchuk R., Uschapovskiy D., Vorobyova V., Linyucheva O., Kotyk M., Vasyliiev, G. Additive concentration and nozzle moving speed influence on local copper deposition for electrochemical 3D-printing: Original scientific paper. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, № 14(2), 2024, pp. 265–273.
4. Uschpovskiy D., Babchuk R., Kotyk M., Vorobyova V., Vasyliiev G. Electrochemical additive manufacturing of copper parts: printed material properties vs. traditionally deposited. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2024 <https://doi.org/10.1007/s10008-024-06026-x>

5. Ushchapovskiy D., Vorobyova V., Plivak O., Motronyuk T., Vasyliiev G. Limitations of copper nitrate electrolyte for fast electrochemical 3d-printing. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, № 27(4), 2022. pp. 77–87.
6. Storchak, M., Zakiev, I., Zakiev, V., Manokhin, A. Coatings strength evaluation of cutting inserts using advanced multi-pass scratch method. *Measurement: Journal of the Inter-national Measurement Confederation*, № 191, 2022, p. 110745.
7. Mechnik V.A., Bondarenko M.O., Kolodnitskiy V.M., Zakiev V.I., Zakiev I.M., Kuzin M.O., Gevorkyan E.S. Influence of diamond–matrix transition zone structure on mechanical properties and wear of sintered diamond-containing composites based on Fe–Cu–Ni–Sn matrix with varying CrB<sub>2</sub> content. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, № 100, 2021, p. 105655.
8. Безконтактний інтерференційний 3-D профілограф “Micron-alpha”. Веб-сайт Інституту промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій. URL: <https://nmetau.edu.ua/ua/mdiv/i2025/p1573>

### References

1. Kunieda, M., Katoh, R., Mori, Y. (1998) Rapid prototyping by selective electrodeposition using electrolyte jet. *CIRP Annals*, 47(1), 161–164.
2. Pravda, A.A., Radchenkova, A.P., Larin, V.I. (2008) Vplyv hlytsynu na protses elektroosadzhennya midi z nitratnoho elektrolitu [Effect of glycine on the process of electrodeposition of copper from nitrate electrolyte]. *Visnik Kharkivs'kogo natsional'nogo universitetu im. V.N. Karazina № 820. Ser. : KHimiya*, 16(39), С. 353–356 (in ukr.)
3. Babchuk, R., Ushchapovskiy, D., Vorobyova, V., Linyucheva, O., Kotyk, M., Vasyliiev, G. (2024) Additive concentration and nozzle moving speed influence on local copper deposition for electrochemical 3D-printing: Original scientific paper. *Journal of Electrochemical Science and Engineering*, 14(2), 265–273.
4. Ushchapovskiy, D., Babchuk, R., Kotyk, M., Vorobyova, V., Vasyliiev, G. (2024) Electrochemical additive manufacturing of copper parts: printed material properties vs. traditionally deposited. *Journal of Solid State Electrochemistry* <https://doi.org/10.1007/s10008-024-06026-x>
5. Ushchapovskiy, D., Vorobyova, V., Plivak, O., Motronyuk, T., Vasyliiev, G. (2022) Limitations of copper nitrate electrolyte for fast electrochemical 3d-printing. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, 27(4), 77–87.
6. Storchak, M., Zakiev, I., Zakiev, V., Manokhin, A. Coatings strength evaluation of cutting inserts using advanced multi-pass scratch method. *Measurement: Journal of the Inter-national Measurement Confederation*, № 191, 2022, p. 110745.
7. Mechnik, V.A., Bondarenko, M.O., Kolodnitskiy, V.M., Zakiev, V.I., Zakiev, I.M., Kuzin M.O. (2021) Gevorkyan E.S. Influence of diamond–matrix transition zone structure on mechanical properties and wear of sintered diamond-containing composites based on Fe–Cu–Ni–Sn matrix with varying CrB<sub>2</sub> content. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 100, 105655.
8. The Contactless interferential 3-D profilograf of “Micron-alpha”. URL: <https://nmetau.edu.ua/ua/mdiv/i2025/p1573>

В. П. СЛАВИЧ

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0001-7882-4198

М. О. САВЧЕНКО

студент кафедри транспортних систем і технічного сервісу  
Херсонський національний технічний університет

## МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ СВІТЛОФОРНОЇ СИГНАЛІЗАЦІЇ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ВСТАНОВЛЕНОЇ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ

*Існують різноманітні системи управління світлофорною сигналізацією дорожніх перехресть, які базуються на різних принципах та критеріях, за якими відбувається зміна режимів регулювання транспортними потоками. Але сучасними серед них є такі системи, які дозволяють змінювати параметри світлофорного циклу в залежності від певних наперед заданих вхідних умов. Розробка та впровадження таких моделей управління регульованими перехрестями та їх окремих елементів є важливим і актуальним завданням, що дозволяє вирішувати певні проблеми дорожнього руху. В даній роботі запропоновано розробку моделі управління світлофорною сигналізацією міського перехрестя, що має класичний х-образний вигляд із наявними чотирма підходами до нього та на якому встановлено класичну двофазну систему світлофорного регулювання, що здатна змінювати основні параметри режиму роботи світлофору в залежності від встановленого критерію управління – наперед заданої фіксованої кількості автомобілів, що здатна проїхати через перехрестя за час горіння дозволеного сигналу світлофора. Така система буде особливо важлива для таких перехресть, для яких необхідно встановити обмежену пропускну здатність для одного підходу або для усіх з наявних до нього підходів, причому зазначене обмеження може бути як верхнім, так і нижнім в залежності від необхідних змін. Таке штучне обмеження дозволить вирішити важливу проблему малої пропускну здатності перехрестя, якщо при наявних класичних параметрах світлофорного регулювання велика частина транспортних засобів не встигає проїжджати перехрестя за час дозволеного сигналу, тоді для її збільшення доцільним буде застосування запропонованої в роботі системи управління.*

**Ключові слова:** транспортний потік, дорожній рух, перехрестя, система управління транспортним потоком, світлофорна сигналізація, пропуску здатність перехрестя, транспортна мережа.

V. P. SLAVYCH

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Transport Systems and Technical Service  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0001-7882-4198

M. O. SAVCHENKO

Student at the Department of Transport Systems and Technical Service  
Kherson National Technical University

## MODEL OF CONTROL OF THE PARAMETERS OF THE LIGHT FORCE SIGNALING DEPENDING ON THE SET PERFORMANCE CAPACITY

*There are various traffic signal control systems of road intersections, which are based on different principles and criteria, according to which the modes of regulation of traffic flows are changed. But modern among them are such systems that allow you to change the parameters of the traffic light cycle depending on certain predetermined input conditions. The development and implementation of such management models of regulated intersections and their separate elements is an important and urgent task that allows solving certain traffic problems. This paper proposes the development of a traffic light signaling control model for an urban intersection, which has a classic x-shaped appearance with four approaches to it and on which a classic two-phase traffic light regulation system is installed, which is able to change the main parameters of the traffic light operation mode depending on the established control criterion – a predetermined fixed number of cars that can pass through the intersection during the time the permitted traffic light signal is lit. Such a system will be especially important for such intersections, for which it is necessary to establish a limited carrying capacity for one approach or for all of the available approaches to it, and the specified limit can be both upper and lower depending on the required changes. Such an artificial limitation will allow to solve the important problem of low capacity of the intersection, if with the available classical parameters of the traffic light regulation, most of the vehicles do not*

have time to pass the intersection during the permitted signal time, then to increase it, it will be appropriate to use the control system proposed in the work.

**Key words:** traffic flow, road traffic, intersection, traffic flow control system, traffic signal, intersection capacity, transport network.

### Постановка проблеми

Серед систем управління світлофорною сигналізацією дорожніх перехресть сучасними є такі системи, які дозволяють змінювати параметри світлофорного циклу в залежності від певних наперед заданих вхідних умов. Розробка та впровадження таких моделей управління регульованими перехрестями та їх окремих елементів є важливим і актуальним завданням, що дозволяє вирішувати певні проблеми дорожнього руху, зокрема пов'язаних із пропускнуою здатністю перехрестя.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

В наш час існують різні методи інтелектуального управління світлофорною сигналізацією. Аналіз робіт закордонних та вітчизняних дослідників, присвячених даній проблемі, показав, що в різних країнах застосовуються різні прийоми та методи регулювання транспортного руху на перехресті [1-6].

Проблеми оптимізації режимів світлофорного регулювання розглядали вітчизняні та іноземні науковці, зокрема В.П. Поліщук, В.І. Єресов, О.П. Дзюба, Ю.О. Кременець, М.П. Печерський, Д.С. Самойлов, М.С. Фішельсон, Б.М. Четверухін, В.Т. Капітанов, Є.О. Рейцен, Ф. Вебстер, Х. Іносе, Т. Хамада [1-14] та ін.

### Формулювання мети досліджень

Метою роботи є розробка моделі управління світлофорною сигналізацією, яка здатна змінювати параметри режиму роботи світлофору в залежності від наступного критерію: встановленої наперед фіксованої кількості автомобілів, що здатна проїхати за час горіння зеленого сигналу світлофору.

### Викладення основного матеріалу досліджень

Розглянемо класичне X образне перехрестя, застосуємо до нього дискретну клітинкову модель, тоді перехрестя буде представляти собою сукупність клітинок по яким рухаються автомобілі, причому кожна клітинка буде мати два стани, які відповідно будуть позначатися пустою клітинкою, якщо в ній автомобільне не знаходиться, та зафарбованою клітинкою, якщо автомобіль в ній знаходиться (рис. 1).

Перехрестя має чотири підходи, в кожному з них прибувають автомобілі з різною частотою. Перехрестя є регульованим, на ньому встановлено світлофорну сигналізацію, яка буде працювати в класичному двофазному режимі.

Вхідні параметри даної моделі представлено в табл. 1.

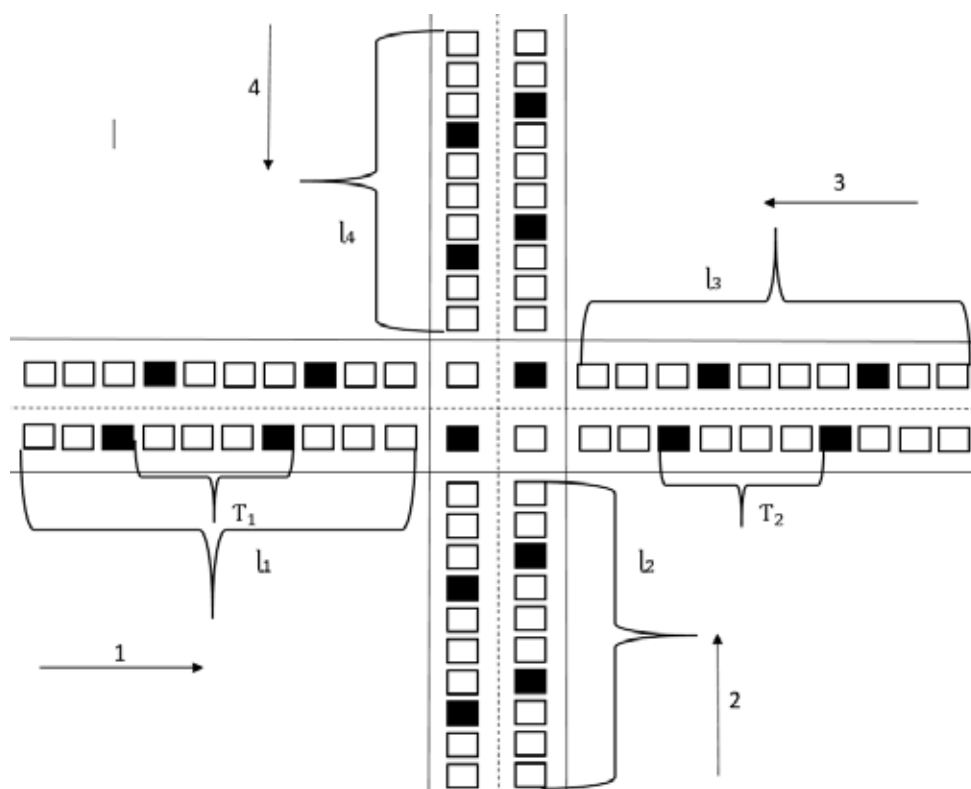


Рис. 1. Дискретна модель перехрестя

Таблиця 1

Вхідні параметри моделі

Позначення	Опис	Одиниця виміру
$\Delta t$	Час за який в систему прибуває один новий автомобіль	Секунди
$T_1$	Інтервали між машинами відповідно для кожного з підходів	Секунди
$T_2$	Інтервали між машинами відповідно для кожного з підходів	Секунди
$T_3$	Інтервали між машинами відповідно для кожного з підходів	Секунди
$T_4$	Інтервали між машинами відповідно для кожного з підходів	Секунди
$l_1$	Кількість клітинок від початку мережі до центру перехрестя для кожного з підходів	Одиниць
$l_2$	Кількість клітинок від початку мережі до центру перехрестя для кожного з підходів	Одиниць
$l_3$	Кількість клітинок від початку мережі до центру перехрестя для кожного з підходів	Одиниць
$l_4$	Кількість клітинок від початку мережі до центру перехрестя для кожного з підходів	Одиниць

Визначимо тривалість горіння зеленого сигналу світлофора в залежності від параметру  $k$  – кількості автомобілів, що встигає проїхати на зелений сигнал, де  $k$  буде узагальненим для всіх чотирьох підходів.

Для виведення формули побудуємо схему руху машин.

Зафіксуємо з рис. 1 перехрестя тільки ту його частину, що відповідає за перший підхід.

Схема буде представляти собою часові зміни положення автомобілів з течією часу. Інтервал часу між рядками дорівнює  $\Delta t$ , тобто часу за який автомобілі зміщуються на одну клітинку.

В початковий момент часу перший автомобіль з'являється в крайній лівій клітинці підходу після чого з кожним рядком відбувається їх переміщення та поява нових автомобілів.

Згідно цієї схеми виводимо формули.

Для виведення тривалості зеленої фази для першого підходу спочатку розраховуємо це значення для першого автомобіля, тобто  $T_{31}(1)$ , воно буде дорівнювати довжині підходу плюс одна клітинка, що розташована яку автомобіль має проїхати перетнувши стоп лінію перехрестя:

$T_{31}(1) = l_1 + 1$ , далі розрахуємо значення для двох автомобілів.

Очевидно, що воно буде більше за попереднє значення  $T_{31}(1)$  на величину  $T_1$ .

Далі розмірковуючи таким чином видно, що кожне наступне значення буде відрізнятися від попереднього на величину відстані між автомобілями тобто,  $T_1$  тоді для довільного значення  $k$  формула буде мати вигляд:

$$T_{31}(k) = (l_1 + 1) + (k - 1) \cdot T_1 \tag{1}$$

Аналогічно розмірковуючи виводимо такі самі формули для 2,3,4 напрямку, вони будуть мати вигляд:

$$T_{32}(k) = (l_2 + 1) + (k - 1) \cdot T_2$$

$$T_{33}(k) = (l_3 + 1) + (k - 1) \cdot T_3$$

$$T_{34}(k) = (l_4 + 1) + (k - 1) \cdot T_4$$

Тоді для визначення остаточної тривалості зеленої фази вибираємо максимуми з напрямків 1, 3 та 2, 4 тоді цикл світлофору буде мати вигляд:

$$T_3 = \begin{cases} T_{31,3} = \max [T_{31}(k); T_{33}(k)] \\ T_{32,4} = \max [T_{32}(k); T_{34}(k)] \end{cases} \tag{2}$$

$T_3$  для 2, 4 підходів буде відповідати за тривалість червоної фази.

Тоді остаточні значення зеленої та червоної фази знаходяться відповідно із виразів:

$$T_3 = T_{31,3}$$

$$T_4 = T_{32,4}$$

Отже, повний світлофорний цикл визначається наступним чином:

$$T_y(k) = T_3 + T_4 = T_{31,3} + T_{32,4} \tag{3}$$

Тоді тривалість світлофорного циклу за умови, що за час горіння зеленого сигналу у будь-якому з 4 підходів буде проїжджати не менше  $k$  автомобілів, буде визначатись наступним виразом:



$$T_y(k) = \max[(L_1 + 1) + (k - 1) \cdot T_1; (L_3 + 1) + (k - 1) \cdot T_3] + \\ + \max[(L_2 + 1) + (k - 1) \cdot T_2; (L_4 + 1) + (k - 1) \cdot T_4].$$

Отримана формула визначає тривалість світлофорного циклу за умови, що за час горіння зелених сигналів у будь-якому з 4-ох підходів буде проїжджати не менше  $k$  автомобілів.

#### Висновки

Таким чином, в роботі запропоновано модель управління світлофорною сигналізацією, яка здатна змінювати параметри режиму роботи світлофору в залежності від встановленої наперед фіксованої кількості автомобілів, що здатна проїхати за час горіння зеленого сигналу світлофора з будь-якого з підходів. Це особливо важливо для таких перехресть, для яких необхідно встановити обмежену пропускну здатність для одного або для всіх з наявних до нього підходів, причому таке обмеження можливо як зверху так, і знизу.

#### Список використаної літератури

1. Гаврилов Е. В., Дмитриченко Е. В., Доля В. К. Організація дорожнього руху. Київ : Знання України, 2007. 452 с.
2. Єресов В. І., Рябець Я. В. Конфліктні ситуації та безпека руху пішоходів. *Безпека дорожнього руху України. Науково-технічний вісник*. 2001. № 2(10). С. 24–30.
3. Левковець П. Р., Сергійчук І. М., Сергійчук А. І. Удосконалення керування рухом автотранспортних засобів. *Вісник Національного транспортного університету*. 2006. № 11. С. 236–239.
4. Математичні методи оптимізації транспортних процесів: навч. посіб. / О. В. Павленко та ін. Харків : Видавництво ХНАДУ, 2008. 204 с.
5. Організація та регулювання дорожнього руху / В. П. Поліщук та ін. Київ, 2014. 467 с.
6. Славич В. П. Модель визначення довжини черги транспортних засобів при заданих параметрах світлофорного регулювання. *Проблеми інформаційних технологій*. 2014. № 02(016). С. 122–124.
7. Славич В. П., Дербеденев А. В. Модель функціонування транспортного затору та визначення часу його подолання. *Вісник ХНТУ*. 2019. № 2(69). С. 169–173.
8. Славич В. П., Лівандовський В. С. Модель системи управління світлофорною пішохідною сигналізацією. *Комунальне господарство міст*. 2021. Т. 6, № 166. С. 227–231.
9. Farzaneh M., Rakha H. Modeling traffic dispersion. Blacksburg : Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005. 139 p.
10. Sacks G., Rayner M., Swinburn B. Impact of front-of-pack 'traffic-light' nutrition labelling on consumer food purchases in the UK. *Health promotion international*. 2009. Vol. 24, no 4. P. 344–352.
11. Tubaishat M., Shang Y., Shi H. Adaptive traffic light control with wireless sensor networks. *IEEE Consumer Communications and Networking Conference*. 2007. P. 187–191.
12. Zabyshnyi Y.O., Semchuk Y.M., Melnyk V.M., Dolishniy B.V. Influence of exhaust for air condition in cities. *The scientific heritage*. 2016, Vol. 1, no 3(3). P. 28-34.
13. Reconciled platoon accommodation at traffic signals / J. Wasson et al. West Lafayette : Indiana Department of Transportation and Purdue University. 1999. 200 p.
14. Yu. L. Real-time calibration of platoon dispersion model to optimize the coordinated traffic signal timing in atms networks. Texas : Texas Southern University, 1999. 51 p.

#### References

1. Gavrilov E. V., Dmytrychenko E. V., Dolya. V. K. (2007) Traffic organization. Kyiv: Knowledge of Ukraine, p. 452.
2. Yeresov V. I., Ryabets Y. V. (2001) Conflict situations and pedestrian safety. Road traffic safety in Ukraine. Scientific and technical bulletin. No. 2(10). pp. 24–30.
3. Levkovets P.R., Serhiychuk I.M., Serhiichuk A.I. (2006) Improvement of vehicle traffic control. Bulletin of the National Transport University. No. 11. pp. 236–239.
4. Pavlenko O. V. (2008) Mathematical methods of optimizing transport processes: teaching. manual / O. V. Pavlenko and others. Kharkiv: Khnadu Publishing House. p. 204.
5. Polishchuk V. P. (2014) Organization and regulation of road traffic / V. P. Polishchuk and others. Kyiv. p. 467.
6. Slavych V. P. (2014) Model for determining the length of a queue of vehicles with given traffic light regulation parameters. Problems of information technologies. No. 02(016). pp. 122–124.
7. Slavych V. P., Derbedenev A. V. (2019) Model of traffic jam functioning and determination of time to overcome it. KhNTU Bulletin. No. 2(69). pp. 169–173.
8. Slavych V. P., Livandovskiy V. S. (2021) Model of the traffic light pedestrian signaling control system. Communal management of cities. Vol. 6, No. 166. pp. 227–231.

9. Farzaneh M., Rakha H. (2005) Modeling traffic dispersion. Blacksburg : Virginia Polytechnic Institute and State University. p. 139.
10. Sacks G., Rayner M., Swinburn B. (2009) Impact of front-of-pack 'traffic-light' nutrition labelling on consumer food purchases in the UK. *Health promotion international*. Vol. 24, no 4. pp. 344–352.
11. Tubaishat M., Shang Y., Shi H. (2007) Adaptive traffic light control with wireless sensor networks. *IEEE Consumer Communications and Networking Conference*. pp. 187–191.
12. Zabyshnyi Y. O., Semchuk Y. M., Melnyk V. M., Dolishniy B. V. (2016) Influence of exhaust for air condition in cities. *The scientific heritage*. Vol. 1, no 3(3). pp. 28–34.
13. Wasson J. (1999) Reconciled platoon accommodation at traffic signals / J. Wasson et al. West Lafayette : Indiana Department of Transportation and Purdue University. p. 200.
14. Yu. L. (1999) Real-time calibration of platoon dispersion model to optimize the coordinated traffic signal timing in atms networks. Texas : Texas Southern University. p. 51.

УДК 621.791.92

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.16>**М. В. СОКОЛОВСЬКИЙ**

провідний інженер відділу спеціалізованої високовольтної техніки  
та лазерного зварювання  
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона  
Національної академії наук України  
ORCID: 0000-0003-3243-5060

**О. В. СІОРА**

науковий співробітник відділу спеціалізованої високовольтної техніки  
та лазерного зварювання  
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона  
Національної академії наук України  
ORCID: 0000-0003-1927-790X

**Ю. В. ЮРЧЕНКО**

провідний інженер відділу спеціалізованої високовольтної техніки  
та лазерного зварювання  
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона  
Національної академії наук України  
ORCID: 0000-0001-9253-009X

**В. А. ЛУКАШЕНКО**

кандидат технічних наук,  
науковий співробітник відділу спеціалізованої високовольтної техніки  
та лазерного зварювання  
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона  
Національної академії наук України  
ORCID: 0000-0002-9685-4654

**А. В. БЕРНАЦЬКИЙ**

кандидат технічних наук, старший дослідник,  
завідувач відділу спеціалізованої високовольтної техніки  
та лазерного зварювання  
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона  
Національної академії наук України  
ORCID: 0000-0002-8050-5580

## **ВСТАНОВЛЕННЯ ВПЛИВУ СКЛАДОВИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ НА ФОРМОУТВОРЕННЯ НАПЛАВЛЕНОГО ШАРУ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ НАПЛАВЛЕННІ НА ТОНКОСТІННУ ОСНОВУ**

*Тонкостінні деталі широко використовуються в авіапромисловості, двигунобудуванні, а також в інших сферах промисловості. Такі деталі часто потребують виготовлення конструктивних елементів, які можна отримати за допомогою багатьох технологій, включаючи лазерне наплавлення. При використанні технологій наплавлення конструктивних елементів на тонкостінну основу, деталі постійно проходять через циклічну термообробку. Зміна градієнта температури протягом тривалого часу сприяє можливому утворенню додаткових внутрішніх напружень, що може призвести до утворення тріщин та деформацій на тонкостінних деталях. Крім того, під впливом різних факторів, що впливають на деталь під час її кінцевої механічної обробки, тонкостінні деталі можуть деформуватися, що може знизити точність виробництва, а також можуть призвести до утворення додаткових напружень в матеріалі. У даний час основними проблемами, що є актуальними під час вивчення даного технологічного процесу є аналіз впливу параметрів обробки та швидкого змінного температурного циклу на мікроструктуру і геометричні характеристики треків наплавленого матеріалу, а також контроль накопичення теплого і залишкового напруження. Завданням даної роботи є вивчення ступеню впливу характеристик робочих циклів лазерного випромінювання на геометричні параметри наплавлених об'єктів елементів на тонкостінних деталях відповідальних конструкцій. Після проведення ряду експериментальних робіт та аналізу їх результатів було визначено певні залежності впливу характеристик робочих режимів лазерного технологічного комплексу на формоутворення та геометричні характеристики наплавленого шару при лазер-*

ному наплавленні на тонкостінну основу, а також обрано оптимальні характеристики для робочого режиму. Даний робочий режим було використано для подальшої роботи з створення технологічних рекомендацій для лазерного наплавлення на тонкостінну основу.

**Ключові слова:** лазерне наплавлення, тонкостінна основа, високолеговані сталі, технологічні режими.

M. V. SOKOLOVSKYI

Lead Engineer at the Department of Specialised High-Voltage Equipment  
and Laser Welding  
E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0000-0003-3243-5060

O. V. SIORA

Researcher at the Department of Specialised High-Voltage Equipment  
and Laser Welding  
E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0000-0003-1927-790X

YU. V. YURCHENKO

Lead Engineer at the Department of Specialised High-Voltage Equipment  
and Laser Welding  
E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0000-0001-9253-009X

V. A. LUKASHENKO

Candidate of Technical Sciences,  
Researcher at the Department of Specialised High-Voltage Equipment  
and Laser Welding  
E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0000-0002-9685-4654

A.

V. BERNATSKYI

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,  
Head of the Department of Specialised High-Voltage Equipment  
and Laser Welding  
E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0000-0002-8050-5580

#### **DETERMINING THE INFLUENCE OF THE TECHNOLOGICAL MODE VARIABLES ON THE FORMATION OF THE DEPOSITED LAYER DURING LASER CLADDING ON A THIN-WALLED BASE**

*Thin-walled parts are widely used in the aircraft industry, engine building, and other industries. Such parts often require the manufacture of additional structural elements that can be produced using many technologies, including laser cladding. When using the cladding technology to build structural elements on a thin-walled base, the parts are constantly subjected to cyclic heat treatment. Changes in the temperature gradient over a long period of time contribute to the possible formation of additional internal tension, which can lead to formation of cracks and deformations in thin-walled parts. In addition, under the influence of various factors affecting the part during its final machining, thin-walled parts can be deformed, which can reduce production accuracy and may also lead to the formation of additional stresses in the material. Currently, the main problems that are relevant in the study of this technological process are the analysis of the effect of machining parameters as well as a rapid alternating temperature cycle on the microstructure and geometric characteristics of the deposited material tracks, along with the control of thermal and residual stress accumulation. The purpose of this study is to determine the influence of the laser radiation working mode variables on the geometric parameters of deposited three-dimensional elements on thin-walled parts of critical structures. After conducting a series of experimental works and analyzing their results, certain dependencies of the influence of the characteristics of the laser technological complex operating modes on the formation and geometric characteristics of the deposited layer during laser surfacing on a thin-walled base were determined, and the optimal characteristics for the operating mode were*

obtained. This operating mode was used for further work on the development of technical recommendations for laser surfacing on a thin-walled base.

**Key words:** laser cladding, thin-walled base, high-alloy steel, technological modes.

### Постановка проблеми

Різноманітні вироби можуть включати різні типи тонкостінних деталей, головною характеристикою яких є відсутність жорсткості та високий кінцевий коефіцієнт тонкості, який визначається як відношення їх висоти до товщини. Такі деталі широко використовуються в двигунобудуванні, хімічній, медичній, авіабудівній та інших галузях промисловості. Конструкція таких деталей часто потребує виготовлення елементів, які можна отримати за допомогою багатьох технологій наплавлення, зокрема лазерного [1, 2].

При використанні технологій наплавлення конструктивних елементів на тонкостінну основу, деталі постійно проходять через циклічну термообробку. Зміна градієнта температури протягом тривалого часу сприяє можливому утворенню додаткових внутрішніх напружень, що може призвести до утворення тріщин та деформацій на тонкостінних деталях. Крім того, під впливом різних факторів, що впливають на деталь під час її кінцевої механічної обробки, тонкостінні деталі можуть деформуватися, що може знизити точність виробництва, а також може призвести до утворення додаткових напружень в матеріалі. У даний час основними проблемами, що є актуальними під час вивчення даного технологічного процесу є аналіз впливу параметрів обробки та швидкого змінного температурного циклу, на мікроструктуру і геометричні характеристики треків наплавленого матеріалу, а також контроль накопичення теплового і залишкового напруження.

Виходячи з наведених міркувань та даних, отриманих під час аналізу оглянутих праць, було вирішено, що процеси лазерного наплавлення, має гарні виробничі перспективи через свою відносну простоту та більш глибоку ступінь вивчення. У зв'язку з цим, постає актуальне завдання створення наукових основ, розроблення та створення обладнання і технологічних прийомів лазерного наплавлення для формоутворення об'ємних елементів з наперед заданими експлуатаційними характеристиками на тонкостінних деталях відповідальних конструкцій.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботах, що вивчають вплив енергетичної складової процесів лазерного наплавлення на його результат [3, 4], розглядалися поодинокі випадки аналізу процесу лазерного наплавлення для виконання певних завдань.

З аналізу досліджень виробництва деталей шляхом наплавлення ряду широко використовуваних металів, було виявлено, що існує багато експериментальних досліджень, що досліджують кінцеву мікроструктуру [5, 6] та механічні властивості [7, 8] деталей, виготовлених за допомогою лазерного наплавлення. При цьому, існує недостатньо досліджень, зосереджених на вивченні впливу параметрів лазерного випромінювання (ЛВ) на кінцеву мікроструктуру та механічні властивості деталей. Також можна зазначити певну закономірність: контроль над процесами лазерного наплавлення розглядається у формі спеціальних індивідуальних до кожного технічного завдання режимів обробки. Однак, отриманих в результаті попередніх досліджень даних недостатньо для того, щоб сформулювати повноцінні закономірності щодо впливу окремих характеристик лазерного випромінювання на мікроструктуру деталей, виготовлених за допомогою лазерного наплавлення.

Роботи, що вивчали методи удосконалення технологічних процесів для покращення мікроструктури зразків [9–11], отриманих шляхом лазерного наплавлення, концентрувались на двох напрямках. А саме, контролю процесу утворення мікроструктури через знаходження оптимальної стратегії сканування та схеми подачі порошку, а також недопущення утворення небажаних домішок у структурі зразка, побудованого шляхом лазерного наплавлення. Роботи, що звертали увагу на знаходження більш ефективного шляху сканування та подачі порошку показали достатньо велику проблематику даної складової. Оскільки схема переміщення головки лазерного технологічного комплексу в даному процесі грає велику роль як у мікроструктурі, так і у подальших характеристиках деталі. Так, на великій кількості деталей, що були вивчені у роботі [12], було помічено явища точкової корозії та пігінгу, які негативно впливають на експлуатаційні характеристики деталі. І хоча інші роботи [13] показують, що в певних випадках деталі, виготовлені різними методиками лазерного наплавлення, демонструють кращу корозійну стійкість, ніж деталі з кованою структурою металу, питання механічної міцності деталей, виготовлених методами лазерного наплавлення, залишається досить актуальним.

### Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є вивчення ступеню впливу складових технологічних режимів лазерного наплавлення на геометричні параметри наплавлених об'ємних елементів на тонкостінних деталях відповідальних конструкцій.

### Викладення основного матеріалу дослідження

При розробці технічних пропозицій щодо технологічних заходів лазерного наплавлення, основну увагу було звернено на методику подачі металевого порошку та захисного газу, оскільки саме ці чинники найкраще піддаються впливу за допомогою технологічних заходів.

Для покращення механічних якостей лазерного наплавлення, необхідно було правильно підібрати характеристики робочого режиму лазерного технологічного комплексу, а саме – величину потужності лазерного

випромінювання, часовий проміжок між індивідуальними треками та шарами, розподіл та витрати порошку тощо. Ці характеристики не є універсальними і повинні підбиратись індивідуально, в залежності від енергетичних характеристик лазерного випромінювання, матеріалів обробки, конструктивних особливостей деталей тощо. Особлива увага повинна бути зосереджена на першому шарі наплавлення, що наноситься на матеріал основи.

Також, при нанесенні шарів матеріалу, що наплавляється, необхідно було врахувати термічний вплив лазерного випромінювання на поверхню тонкостінної деталі. Для запобігання небажаних змін в тонкостінному матеріалі деталі було розглянуто необхідність застосування таких технологічних заходів, як використання тепловідвідних підкладок та нагрівальних елементів. Їх використання для типових конструктивних елементів наплавлення (таких як бобишки, приливи, функціональні площадки, бандажні пояси тощо).

Для зменшення вірогідності утворення високого рівня небажаних деформацій та структурних змін, запропоновано контролювати енергетичну складову процесу лазерного плавлення. В процесі розробки технологічних заходів було обрано два найбільш перспективні. Варіювання величини потужності лазерного випромінювання у граничних точках (або на контурі об'єкту, що формується) дає можливість зменшити розміри зони термічного впливу, а також запобігти випадковому проплаву тонкостінної базової деталі. Застосування імпульсного (імпульсно-періодичного) режиму генерації лазерного випромінювання при наплавленні дозволяє більш контролювано передавати теплову енергію, але при цьому різко падає швидкість, а звідси – і технологічність процесу. До того ж, розробка технологій обробки вимагає контролю за траєкторією та робочими режимами лазерного наплавлення для запобігання шкідливого явища перекриття плям обробки.

Для вивчення процесів, що відбуваються при наплавленні, та визначення максимально допустимих характеристик режимів обробки постала потреба до експериментального наплавлення ряду треків на тонкостінну основу. Експериментальне наплавлення металевого порошку було проведено з допомогою твердотільного Nd:YAG-лазера ROFIN-SINAR DY-044. Значення режимів обробки наведені у таблиці 1.

Загальні для всіх режимів обробки значення:

- витрати захисного газу аргону (Ar)  $Q_r = 30$  л/хв;
- витрати порошку  $Q_p = 20$  г/хв;
- температура зовнішнього середовища  $T = 20$  °С.

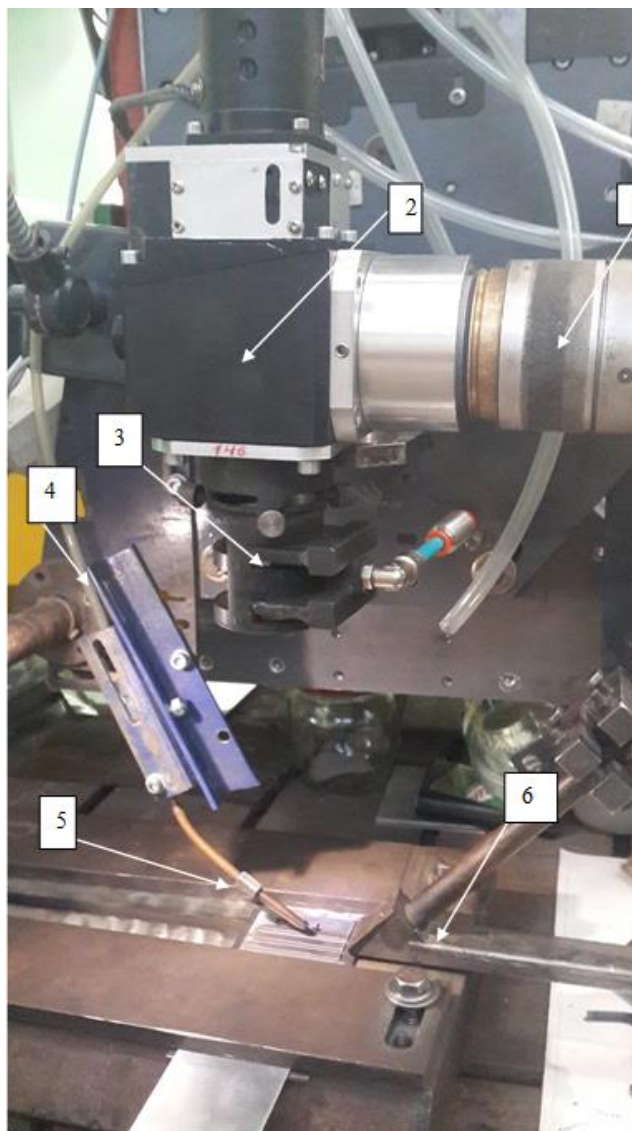
Тонкостінною основою виступала пластина зі сталі AISI 321 (12X18H10T) з розмірами 150×100×1,2 мм, а порошком – Castolin EuTroLoу 16316 (AISI 316L/03X17H14M3) з фракцією 53–150 мкм. Режими обробки варіювались у величині потужності ЛВ (Р) з різницею у 250 Вт. При наплавленні було зафіксовано незначний прогин базових пластин, у декількох випадках відбувся повний провар деталі. Усі наплавлені елементи експериментальних зразків мають валикоподібну гомогенну форму. Наплавлення проводилось на спеціальному стенді з системою захисту оптики «cross jet», зображеному на рис. 1.

Таблиця 1

Режими обробки, що використовувались у експериментах

№ зразка	Р, кВт	V, м/хв	Q, г/с	№ зразка	Р, кВт	V, м/хв	Q, г/с
1502.1	2	2	0	1504.1	3	2	35
1502.2	2	2	35	1504.2	3,5	2	35
1502.3	1,5	2	35	1504.3	2	1,25	35
1502.4	1,75	2	35	1504.4	2	1	35
1502.5	2,25	2	35	1504.5	2	0,75	35
1502.6	2,5	2	35	1504.6	2	2	55
1502.7	2	1,5	35	1504.7	2	2	60
1502.8	2	1,75	35	1504.8	2	2	75
1502.9	2	2,25	35	1504.9	2	2	112
1502.10	2,5	2,5	35				
1502.11	2	2	30				
1502.12	2	2	40				
1502.13	2	2	45				
1502.14	2	2	50				

Для вимірювання розмірів наплавлених доріжок, а також глибини проплаву, з експериментальних зразків було вирізано зразки розміром 8×8 мм, після чого було проведено електролітне травлення даних зразків. Самі вимірювання виконувались на мікроскопі МІМ-7 з лінзою ОЕ-23 (F=23,2 мм; A=0,17; 8,5x) та цифровою камерою SIGETA LP614000A. Отримані розміри наведено у табл. 2.



**Рис. 1.** Стенд для лазерного наплавлення: 1 – лазерна головка; 2 – блок поворотного дзеркала; 3 – «cross jet» – система захисту оптики; 4 – канал по якому транспортується порошок; 5 – формуюче сопло; 6 – система газового захисту напавленого металу

При комбінаціях потужностей та швидкості переміщення ЛВ у 3,5 кВт – 2 м/хв та 2 кВт – 0,75 м/хв було зафіксовано повний провар тонкостінної основи, що визначає ці значення як такі, що не можуть використовуватися при лазерному напавленні на тонкостінну основу (товщиною 1,2 мм).

Дані, отримані в результаті цього експерименту, були представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 2 та рис. 3.

Аналіз даних представлених на рис. 2, дозволив встановити певні залежності геометричних характеристик напавлених елементів від величини потужності ЛВ:

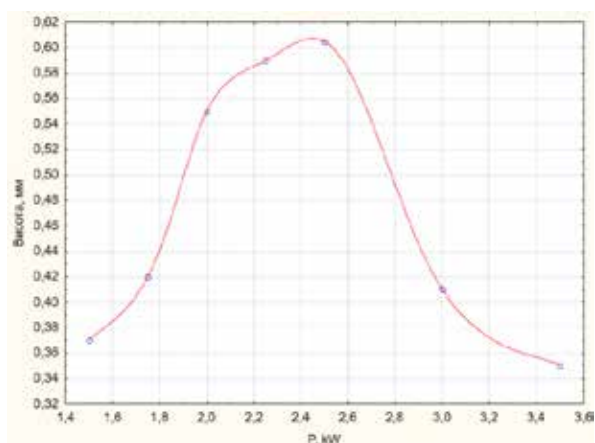
- висота напавленого елемента відносно площини тонкостінної основи має пікову величину у 0,58–0,62 мм при обробці лазерним випромінюванням з потужністю у 2–2,5 квт. при подальшому підвищенні потужності лазерного випромінювання висота напавленого шару зменшується, що можна пов'язати з постійним гіперболічним зростанням величини глибини провару/проникнення напавленого матеріалу вглиб тонкостінної основи. ця теорія підтверджується завдяки графіку загальної висоти напавленого елемента;

- ширина напавленого елемента має тенденцію на зростання до величини потужності лазерного випромінювання у 2,25 квт, при подальшому збільшенні потужності величина стабілізується і тримається на рівні 2,8–2,95 мм.

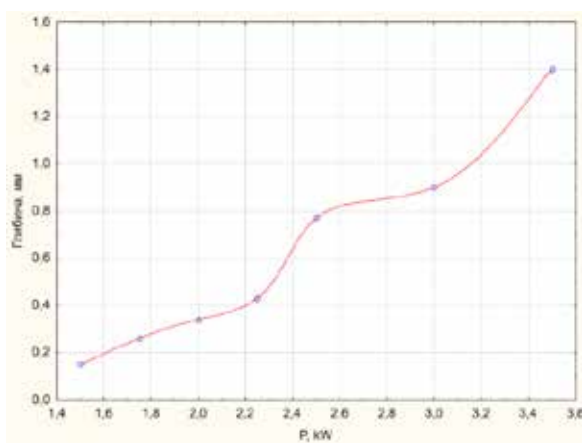
Таблиця 2

Геометричні характеристики наплавлених доріжок

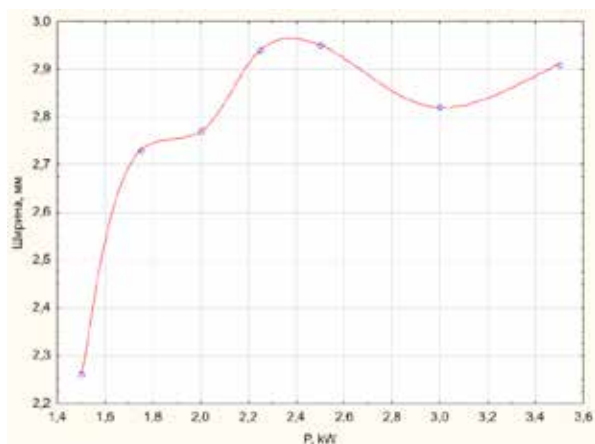
№ зразка	Ширина, мм	Висота, мм	Провар, мм	№ зразка	Ширина, мм	Висота, мм	Провар, мм
1502.1	2,58	0	0,44	1504.1	2,82	0,41	0,9
1502.2	2,77	0,55	0,34	1504.2	2,91	0,35	1,4
1502.3	2,26	0,37	0,15	1504.3	3,15	0,41	0,66
1502.4	2,73	0,42	0,26	1504.4	2,91	0,52	0,98
1502.5	2,94	0,59	0,43	1504.5	3,15	0,67	1,42
1502.6	2,95	0,605	0,77	1504.6	2,5	0,28	0,48
1502.7	2,94	0,62	0,23	1504.7	2,6	0,41	0,38
1502.8	2,88	0,47	0,26	1504.8	2,62	0,4	0,21
1502.9	2,79	0,39	0,19	1504.9	2,58	0,66	0,15
1502.10	2,55	0,32	0,2				
1502.11	2,86	0,46	0,16				
1502.12	2,6	0,49	0,1				
1502.13	2,63	0,52	0,13				
1502.14	2,62	0,51	0,12				



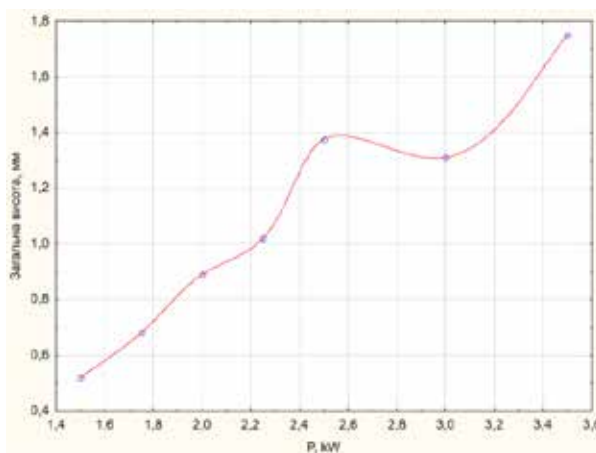
а)



б)



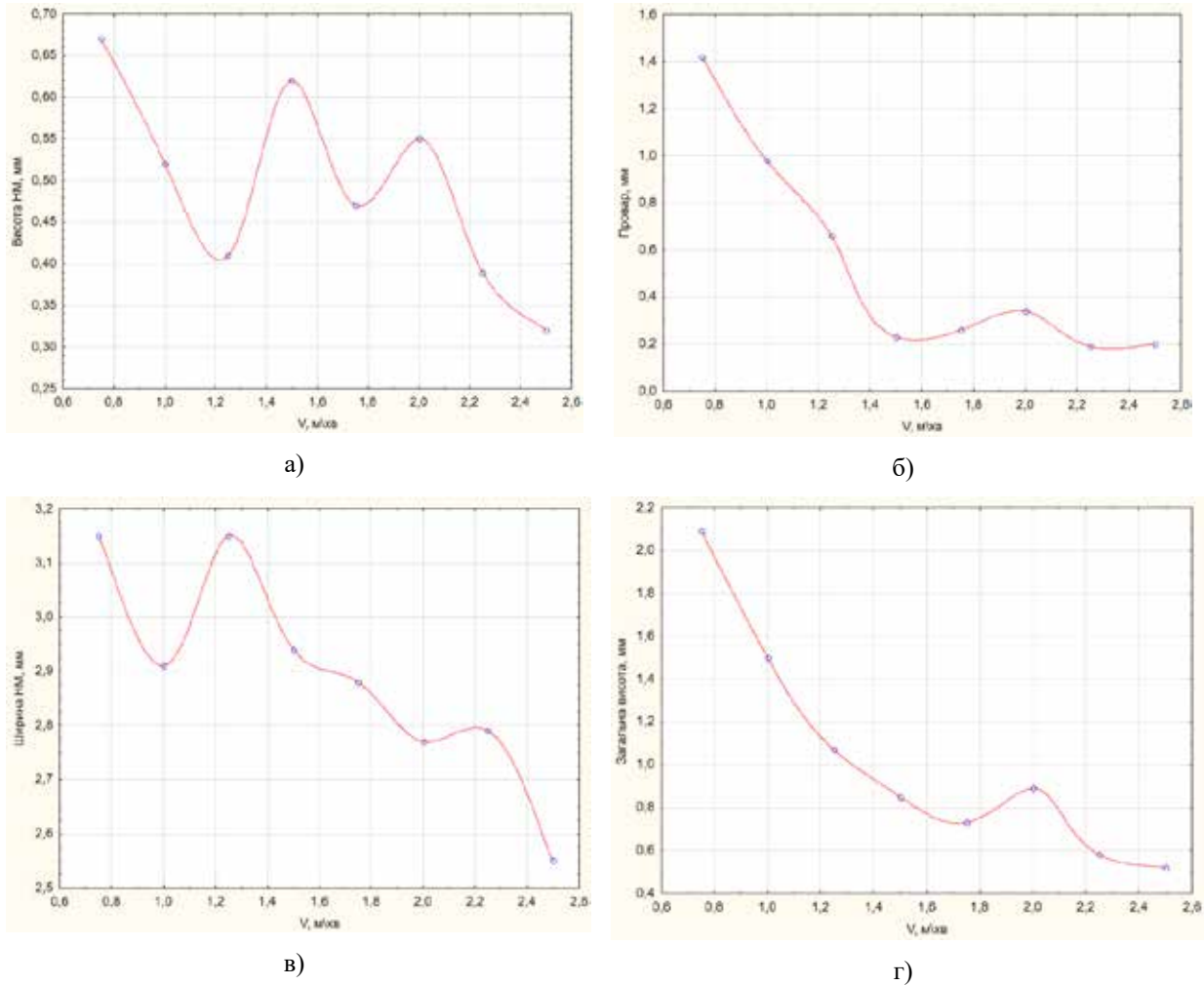
в)



г)

Рис. 2. Графічні залежності розмірних характеристик наплавленого елемента від потужності лазерного випромінювання: а) висоти наплавленого елемента відносно площини тонкостінної основи, б) глибини провару матеріалу основи та заповнення даної порожнини сумішшю розплаву та наплавленого матеріалу, в) ширини наплавленого елемента відносно площини тонкостінної основи, г) загальної висоти наплавленого елемента





**Рис. 3. Графіки залежності розмірних характеристик наплавленого елемента від швидкості переміщення лазерного променя: а) висоти наплавленого елемента відносно площини тонкостінної основи, б) глибини проникнення наплавленого матеріалу, в) ширини наплавленого елемента відносно площини тонкостінної основи, г) загальної висоти наплавленого елемента**

Для розробки технології лазерного наплавлення на тонкостінну основу необхідно було підібрати такі величини характеристик робочого режиму, котрі б забезпечували якомога швидке нарощування матеріалу. Для цього потрібно, щоб дані величини забезпечували баланс максимального практичного значення висоти наплавленого матеріалу відносно площини тонкостінної основи та достатньо малої глибини проплаву для запобігання прожогу матеріалу основи. Через це, можна заявити, що при витримці всіх інших параметрів на рівнях, вказаних при плануванні експерименту, оптимальним значенням потужності лазерного випромінювання для наплавлення даних матеріалів є величина у  $2 \text{ кВт} \pm 250 \text{ Вт}$ .

У цьому випадку, побудувати прямих залежності розмірів наплавлених елементів від швидкості переміщення лазерного променя складно, оскільки:

- висота наплавленого елемента відносно площини тонкостінної основи має тенденцію на зниження, однак ця тенденція нестабільна, з рядом піків при швидкостях у 1,5 та 2 м/хв;
- схоже можна зазначити і про величину провару, однак тут падіння величини стабільне;
- ширина наплавлення при цьому швидко знижується, за винятком аномальної точки при швидкості у 1 м/хв та зони стабілізації при швидкостях у 2–2,25 м/хв;
- при всьому цьому можна помітити, що графік величини загальної висоти має параболічну форму, за винятком пікової точки при швидкості у 2 м/хв.

Згідно з критеріями вибору величин характеристик технологічних режимів, наведених вище, можна зробити висновок, що зразки, виготовлені при швидкості переміщення лазерного променя 2 м/хв, мають кращі геометричні характеристики наплавлених елементів, ніж зразки виготовлені при інших швидкостях. Через це саме дана швидкість обирається як оптимальна.

### Висновки

Завдяки аналізу експериментальних даних, було виведено, що оптимальними параметрами обробки для наплавлення сталевого порошку з матеріалу AISI 316L (03X17H14M3) на пластину зі сталі AISI 321 (12X18H10T) товщиною 1,2 мм, є потужність лазерного випромінювання у 2 кВт та швидкість переміщення лазерного променя у 2 м/хв. Ці дані були використані для оформлення технологічних рекомендацій з лазерного наплавлення на тонкостінну основу.

### Список використаної літератури

1. Del Sol I., Rivero A., López de Lacalle L. N., Gamez A. J. Thin-wall machining of light alloys: A review of models and industrial approaches. *Materials*. 2019. Vol. 12, No. 12. P. 2012. URL: <https://doi.org/10.3390/ma12122012>
2. Sokolovskyi M., Bernatskyi, A. Developmental review of metal additive manufacturing processes. *History of Science and Technology*. 2023. Vol. 13, No. 2. P. 334-356. URL: <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2023-13-2-334-356>
3. Zheng M., Wei L., Chen J., Zhang Q., Zhang G., Lin X., Huang W. On the role of energy input in the surface morphology and microstructure during selective laser melting of Inconel 718 alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 11. P. 392-403. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.024>
4. Jiang H., Li Z., Feng T., Wu P., Chen Q., Feng Y., Chen L., Hou J., Xu H. Effect of process parameters on defects, melt pool shape, microstructure, and tensile behavior of 316L stainless steel produced by selective laser melting. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2020. Vol. 34, No. 4. P. 495-510. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s40195-020-01143-8>
5. Zheng M., Wei L., Chen J., Zhang Q., Zhong C., Lin X., Huang, W. A novel method for the molten pool and porosity formation modelling in selective laser melting. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 140. P. 1091-1105. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.038>
6. Zheng M., Wei L., Chen J., Zhang Q., Li J., Sui S., Wang G., Huang W. Surface morphology evolution during pulsed selective laser melting: Numerical and experimental investigations. *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 496. P. 143649. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143649>
7. Safdar A., He H., Wei L., Snis A., Chavez de Paz, L. Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V. *Rapid Prototyping Journal*. 2012. Vol. 18. No. 5. P. 401-408. URL: <http://dx.doi.org/10.1108/13552541211250391>
8. Wang L., Wei Q., Shi Y., Liu J., He W. Experimental Investigation into the Single-Track of Selective Laser Melting of IN625. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 233-235. P. 2844-2848. URL: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.233-235.2844>
9. Trelewicz J., Halada G., Donaldson O., Manogharan G. Microstructure and corrosion resistance of laser additively manufactured 316L stainless steel. *JOM*. 2016. Vol. 68. No. 3. P. 850-859. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-016-1822-4>
10. AlMangour B., Grzesiak D., Yang J. Scanning strategies for texture and anisotropy tailoring during selective laser melting of TiC/316L stainless steel nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 728. P. 424-435. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.022>
11. Zhao C., Bai Y., Zhang Y., Wang X., Xue J., Wang H. Influence of scanning strategy and building direction on microstructure and corrosion behaviour of selective laser melted 316L stainless steel. *Materials & Design*. 2021. Vol. 209. P. 109999. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109999>
12. Ji H., Gupta M., Song Q., Cai W., Zheng T., Zhao Y., Liu Z., Pimenov D. Microstructure and machinability evaluation in micro milling of selective laser melted Inconel 718 alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. Vol. 14. P. 348-362. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.081>
13. Sander G., Thomas S., Cruz V., Jurg M., Birbilis N., Gao X., Brameld M., Hutchinson C. On the corrosion and metastable pitting characteristics of 316L stainless steel produced by selective laser melting. *Journal of the Electrochemical Society*. 2017. Vol. 164. No. 6. P. C250-C257. URL: <http://dx.doi.org/10.1149/2.0551706jes>

### References

1. Del Sol, I., Rivero, A., López de Lacalle, L. N., & Gamez, A. J. (2019). Thin-wall machining of Light Alloys: A review of models and industrial approaches. *Materials*, 12(12), 2012. <https://doi.org/10.3390/ma12122012>
2. Sokolovskyi, M., & Bernatskyi, A. (2023). Developmental review of metal additive manufacturing processes. *History of Science and Technology*, 13(2), 334-356. <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2023-13-2-334-356>
3. Zheng, M., Wei, L., Chen, J., Zhang, Q., Zhang, G., Lin, X. and Huang, W., (2021). On the role of energy input in the surface morphology and microstructure during selective laser melting of Inconel 718 alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 11, 392-403. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.024>

4. Jiang, H., Li, Z., Feng, T., Wu, P., Chen, Q., Feng, Y., Chen, L., Hou, J. and Xu, H. (2020). Effect of process parameters on defects, melt pool shape, microstructure, and tensile behavior of 316L stainless steel produced by selective laser melting. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 34(4), 495-510. <http://dx.doi.org/10.1007/s40195-020-01143-8>
5. Zheng, M., Wei, L., Chen, J., Zhang, Q., Zhong, C., Lin, X. and Huang, W. (2019). A novel method for the molten pool and porosity formation modelling in selective laser melting. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 140, 1091-1105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.038>
6. Zheng, M., Wei, L., Chen, J., Zhang, Q., Li, J., Sui, S., Wang, G., & Huang, W. (2019). Surface morphology evolution during pulsed selective laser melting: Numerical and experimental investigations. *Applied Surface Science*, 496, 143649. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.143649>
7. Safdar, A., He, H., Wei, L., Snis, A., & Chavez de Paz, L., (2012). Effect of process parameters settings and thickness on surface roughness of EBM produced Ti-6Al-4V. *Rapid Prototyping Journal*, 18(5), 401-408. <http://dx.doi.org/10.1108/13552541211250391>
8. Wang, L., Wei, Q., Shi, Y., Liu, J., & He, W. (2011). Experimental investigation into the single-track of selective laser melting of IN625. *Advanced Materials Research*, 233-235, 2844-2848. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.233-235.2844>
9. Trelewicz, J., Halada, G., Donaldson, O., & Manogharan, G. (2016). Microstructure and corrosion resistance of laser additively manufactured 316L stainless steel. *JOM*, 68(3), 850-859. <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-016-1822-4>
10. AlMangour, B., Grzesiak, D., & Yang, J. (2017). Scanning strategies for texture and anisotropy tailoring during selective laser melting of TiC/316L stainless steel nanocomposites. *Journal of Alloys and Compounds*, 728, 424-435. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.022>
11. Zhao, C., Bai, Y., Zhang, Y., Wang, X., Xue, J., & Wang, H. (2021). Influence of scanning strategy and building direction on microstructure and corrosion behaviour of selective laser melted 316L stainless steel. *Materials & Design*, 209, 109999. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109999>
12. Ji, H., Gupta, M., Song, Q., Cai, W., Zheng, T., Zhao, Y., Liu, Z., & Pimenov, D. (2021). Microstructure and machinability evaluation in micro milling of selective laser melted Inconel 718 alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 348-362. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.081>
13. Sander, G., Thomas, S., Cruz, V., Jurg, M., Birbilis, N., Gao, X., Brameld, M., & Hutchinson, C. (2017). On the corrosion and metastable pitting characteristics of 316L stainless steel produced by selective laser melting. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(6), C250-C257. <http://dx.doi.org/10.1149/2.0551706jes>

O. O. STOZHOK

Mechanical Engineer / CEO  
Castro Auto Sales LLC (USA)  
ORCID: 0009-0002-9164-7418

## EXPLORING ELECTROMECHANICAL SYSTEMS IN THE DEVELOPMENT OF NEXT-GENERATION ELECTRIC POWERTRAINS

*In the rapidly evolving electric vehicle industry, the study of electromechanical systems in next-generation electric powertrains is of particular relevance. This is driven by the need to enhance energy efficiency, reduce costs, and improve the reliability of vehicles. The article examines the role of innovative materials, advanced design methods, and control algorithms in creating high-efficiency and reliable electric powertrains. Specifically, the impact of nanomaterials such as graphene and carbon nanotubes on reducing motor weight and increasing heat dissipation is analyzed, contributing to improved efficiency and extended driving range. The adoption of additive manufacturing (3D printing) and digital twins accelerates prototyping and component optimization in electric powertrains. Adaptive control algorithms ensure optimal system performance in real-time, enhancing overall efficiency and reliability. Research methods included the analysis of modern materials and technologies, prototyping using additive manufacturing, and the implementation of predictive and adaptive control algorithms. The results demonstrate significant improvements in the performance of electric powertrains due to the use of innovative materials and cutting-edge design technologies. Conclusions confirm that the application of advanced materials and adaptive control algorithms is critical for ensuring the sustainable development of the electric vehicle industry. Future research prospects focus on further refining materials and technologies to enhance scalability and reduce production costs, making electric powertrains more accessible and efficient.*

**Key words:** hybrid technologies, powertrain innovation, energy efficiency, electric vehicles, system integration.

O. O. СТОЖОК

технічний інженер (механічний інженер) / керівник  
Castro Auto Sales LLC (USA)  
ORCID: 0009-0002-9164-7418

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ У РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НАСТУПНОГО ПОКОЛІННЯ

*В умовах стрімкого розвитку електромобільної індустрії, дослідження електромеханічних систем у складі електроприводів наступного покоління набуває особливої актуальності. Це зумовлено необхідністю підвищення енергоефективності, зниження витрат та покращення надійності транспортних засобів. У статті розглянуто роль інноваційних матеріалів, передових методів проектування та алгоритмів керування у створенні високоєфективних і надійних електроприводів. Зокрема, проаналізовано вплив наноматеріалів, таких як графен і вуглецеві нанотрубки, на зниження ваги та підвищення тепловіддачі моторів, що сприяє збільшенню їхньої ефективності та дальності ходу. Впровадження адитивного виробництва та цифрових двійників дозволяє прискорити прототипування та оптимізацію компонентів електроприводів. Адаптивні алгоритми керування забезпечують оптимальну роботу системи в реальному часі, що підвищує її загальну ефективність та надійність. Методи дослідження включали аналіз сучасних матеріалів і технологій, створення прототипів із використанням адитивного виробництва, а також впровадження алгоритмів прогнозування та адаптивного керування. Отримані результати демонструють значні покращення у продуктивності електроприводів завдяки використанню інноваційних матеріалів та новітніх технологій проектування. Висновки підтверджують, що для забезпечення сталого розвитку електромобільної індустрії критично важливим є застосування новітніх матеріалів та адаптивних алгоритмів керування. Подальші перспективи досліджень спрямовані на вдосконалення матеріалів і технологій з метою підвищення масштабованості та зниження витрат на виробництво електроприводів, що дозволить зробити їх доступнішими та ефективнішими.*

**Ключові слова:** гібридні технології, інновації у силових агрегатах, енергоефективність, електричні транспортні засоби, інтеграція систем.

### The problems of the article

The evolution of electric powertrains marks a significant milestone in the quest for sustainable and efficient transportation systems. As the demand for environmentally friendly and energy-efficient vehicles intensifies, the focus on developing next-generation electric powertrains has become more critical than ever. At the heart of this advancement lies the intricate interplay of electromechanical systems, which serve as the foundation for optimizing performance, enhancing energy conversion efficiency, and ensuring the reliability of electric vehicles. The problem, therefore, is

not merely technical but also has profound implications for the future of transportation, energy consumption, and environmental impact.

Electromechanical systems in electric powertrains encompass a broad range of components, including electric motors, power electronics, and energy storage systems. The challenge is to design these systems in a manner that maximizes efficiency while minimizing losses, weight, and cost. This involves not only the integration of advanced materials and innovative design techniques but also the development of sophisticated control algorithms that can dynamically adjust to varying driving conditions. The problem extends to the scalability of these technologies, ensuring that they can be implemented across different vehicle types and production volumes.

The scientific and practical significance of addressing this problem cannot be overstated. From a scientific perspective, it opens up new avenues of research in materials science, electrical engineering, and systems integration. The quest for more efficient powertrains drives innovation in semiconductor technology, thermal management systems, and electromagnetic design. Practically, the successful development of these systems is pivotal for the automotive industry, influencing everything from vehicle design and manufacturing processes to market adoption rates and regulatory compliance.

Moreover, the problem is inherently multidisciplinary, requiring collaboration across fields such as mechanical engineering, electronics, and computational sciences. This interdisciplinary approach is essential for overcoming the technical barriers that currently limit the performance and efficiency of electric powertrains. As the world transitions towards electric mobility, the stakes are high, and the solutions developed will have lasting impacts on global energy consumption patterns, greenhouse gas emissions, and the overall sustainability of transportation networks.

#### **Analysis of sources and recent research**

Research on electromechanical systems in the development of next-generation electric powertrains covers key technological aspects aimed at enhancing efficiency, reliability, and environmental sustainability. Cai W. et al. explore the future of electric powertrains, analyzing the development of electric motors and drive systems for new energy vehicles [1]. Benzaquen J. et al. examine the technical challenges and advancements in electric powertrains for aviation [2]. Hu X. et al. investigate novel approaches to the design and control of electric powertrains for electrified vehicles [3], while Frikha M.A. et al. analyze multiphase motors and drive systems for electric vehicles [4].

Wang L. et al. provide a detailed review of hybrid powertrain architectures, offering a classification and comparison of different approaches [5]. Naqvi S.S.A. et al. focus on the integration of advanced electronic control units to enhance the efficiency of electric powertrains [6]. Smallbone A. et al. assess the impact of disruptive powertrain technologies on energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions from heavy-duty vehicles [7], and Fahimi B. et al. review future prospects for automotive electric propulsion systems, emphasizing the role of innovations in improving energy efficiency [8].

Hua X. et al. study noise, vibration, and harshness (NVH) reduction in electric vehicles [9]. Blaabjerg F. et al. address the reliability of power electronic systems in electric and hybrid vehicles [10]. Hasnain A. et al. analyze technologies and trends in the electrification of medium and heavy-duty vehicles [11], while Ramanath A. examines the application of power electronics in autonomous and electric vehicles [12].

Despite the substantial body of work, it remains crucial to examine the current state of electromechanical systems in electric powertrains, analyze recent advancements in materials, design techniques, and control algorithms, investigate the integration of thermal management systems, and evaluate challenges related to scalability, cost, and reliability.

#### **The purpose of the article**

The purpose of this article is to explore the role of electromechanical systems in the development of next-generation electric powertrains, with a focus on optimizing efficiency, performance, and reliability. The study aims to investigate the key components and technologies that contribute to the advancement of electric powertrains, analyze the challenges associated with their integration, and propose innovative solutions to enhance their scalability and application across different vehicle platforms.

The purpose of this article is to explore the role of electromechanical systems in the development of next-generation electric powertrains, with a focus on optimizing efficiency, performance, and reliability. The study aims to investigate the key components and technologies that contribute to the advancement of electric powertrains, analyze the challenges associated with their integration, and propose innovative solutions to enhance their scalability and application across different vehicle platforms.

The objectives of the article are as follows:

1. To examine the current state of electromechanical systems in electric powertrains and identify the key factors influencing their performance and efficiency.
2. To analyze the latest advancements in materials, design techniques, and control algorithms that contribute to the development of next-generation electric powertrains.
3. To investigate the integration of thermal management systems within electromechanical components to enhance the overall efficiency and lifespan of electric powertrains.
4. To evaluate the challenges and limitations associated with the integration of electromechanical systems in electric powertrains, particularly in terms of scalability, cost, and reliability.

5. To propose recommendations for improving the design, implementation, and scalability of electromechanical systems in future electric powertrains, with an emphasis on enhancing sustainability and reducing costs.

**Presentation of the main material**

The development of next-generation electric powertrains is critical for advancing the sustainability and efficiency of modern transportation systems. At the core of these powertrains are electromechanical systems, which include components such as electric motors, power electronics, and energy storage units. These systems are essential for converting electrical energy into mechanical power, managing energy flow, and ensuring the overall performance and reliability of electric vehicles. The continuous improvement of these components, driven by advancements in materials, design, and control algorithms, is vital for overcoming the challenges associated with efficiency, cost, and scalability. As electric vehicles become more prevalent, understanding the current state and functioning of electromechanical systems is essential for optimizing their performance in real-world conditions.

Table 1 outlines the main components of electromechanical systems in electric powertrains, their primary functions, and the key challenges they currently face.

Table 1

**The main components of electromechanical systems in electric powertrains**

Component	Key Functions	Challenges
Electric Motors	Convert electrical energy into mechanical energy	Efficiency optimization, weight reduction, thermal management
Power Electronics	Control and convert electrical power between components	Efficiency, thermal management, integration with other systems
Energy Storage Systems	Store and supply electrical energy	Energy density, weight, cost, thermal stability
Control Algorithms	Optimize performance and efficiency	Real-time adaptation, complexity, computational demands
Thermal Management Systems	Maintain optimal operating temperatures	Integration with other systems, cost, reliability

Source: created by the author based on [1, 2, 7, 9]

The current performance of these components in modern electric powertrains demonstrates both the progress made and the challenges that remain. Electric motors, for example, have seen significant improvements in efficiency and power density due to advancements in materials and electromagnetic design [13]. However, optimizing their thermal management remains a critical challenge, especially under high load conditions. Power electronics have benefited from innovations in semiconductor materials, which have led to higher efficiency and reduced energy losses. Yet, the integration of these components with other systems, particularly in terms of managing heat and ensuring reliable operation over extended periods, continues to be a significant area of focus.

Table 2 provides an analysis of how these components interact within a complete electric powertrain system and their impact on vehicle performance under current operating conditions.

Table 2

**Interactions and Performance Impacts of Electromechanical Components in Electric Powertrains**

Interaction	Impact on Vehicle Performance	Current Operational Challenges
Electric Motor & Power Electronics	Smooth power delivery, high efficiency	Heat generation, efficiency losses at high loads
Energy Storage & Power Electronics	Reliable energy supply, quick response to power demands	Energy density vs. weight trade-off, thermal stability
Control Algorithms & Thermal Management	Real-time optimization, extended component lifespan	Complexity in adapting to varying conditions, computational demands
Integrated System Performance	Overall vehicle efficiency, reliability, and longevity	Balancing performance with cost and scalability

Source: created by the author based on [12-15]

In contemporary electric vehicles, these interactions play a crucial role in determining the overall performance and reliability of the powertrain. For instance, the seamless interaction between the electric motor and power electronics is essential for smooth power delivery and high efficiency. However, this interaction also leads to significant heat generation, particularly during high-demand scenarios, which can reduce overall system efficiency if not properly managed. Similarly, the relationship between energy storage systems and power electronics affects the vehicle’s ability to meet power demands quickly while maintaining energy efficiency. The trade-off between energy density and weight remains a key challenge, as higher energy density typically involves heavier systems, which can impact the vehicle’s range and performance.

The integration of control algorithms with thermal management systems is particularly crucial for maintaining optimal operating conditions across all components. These algorithms must continuously adapt to varying driving conditions, balancing the need for efficiency with the constraints imposed by thermal limits. The complexity of these systems and their interactions requires sophisticated computational resources, which can add to the cost and complexity of the overall powertrain design. Ensuring that these systems operate efficiently and reliably in real-world conditions remains a major focus of ongoing research and development efforts.

Recent advancements in materials, design techniques, and control algorithms are transforming the development of next-generation electric powertrains. These innovations are crucial for improving the performance, efficiency, and reliability of electric vehicles, which is essential to meet the increasing demand for sustainable and efficient transportation solutions.

Recent developments in materials science include the introduction of advanced nano-materials and smart materials. Nano-materials, such as graphene and carbon nanotubes, offer exceptional strength-to-weight ratios and improved thermal conductivity, which are critical for creating more efficient and lightweight electric motor components. These materials contribute to reducing the overall weight of powertrain systems, enhancing energy efficiency, and extending the vehicle’s range [14]. Additionally, smart materials that adapt their properties in response to environmental changes improve the durability and performance of powertrain components. By incorporating these materials, electric powertrains can achieve higher performance and reliability under varying conditions.

Design techniques have also evolved significantly, with additive manufacturing and digital twins playing key roles. Additive manufacturing, or 3D printing, enables the creation of complex and customized component geometries that were previously unattainable. This technology allows for rapid prototyping and testing of innovative designs, leading to more efficient and optimized powertrain systems. Digital twins, which are virtual replicas of physical systems, provide real-time simulation and analysis capabilities. They enable engineers to predict performance and identify potential issues before physical prototypes are developed, thus accelerating the development process and reducing costs. These advancements in design techniques lead to more precise and innovative powertrain systems.

Control algorithms have similarly advanced, incorporating predictive maintenance and adaptive control strategies. Predictive maintenance algorithms use data analytics and machine learning to forecast potential issues and perform proactive maintenance, reducing downtime and enhancing system reliability. Adaptive control strategies dynamically adjust powertrain parameters based on driving conditions and load requirements, optimizing performance and energy efficiency. Additionally, multi-objective optimization algorithms balance various performance metrics, such as efficiency and power output, in real-time. These advanced control strategies improve the overall functionality and effectiveness of electric powertrains.

Table 3 provides a summary of these advancements and their implications for electric powertrain development.

Table 3

**Impact of Recent Advances in Materials, Design Techniques, and Control Algorithms on the Development of Electric Powertrains**

Aspect	Advancement	Implications for Electric Powertrains
Materials	Nano-materials, smart materials	Enhanced strength-to-weight ratio, improved thermal management, increased durability
Design Techniques	Additive manufacturing, digital twins	Rapid prototyping, customized components, real-time performance simulation
Control Algorithms	Predictive maintenance, adaptive control	Minimized downtime, dynamic performance optimization, multi-objective balancing

*Source: created by the author*

Advanced materials such as nano-materials and smart materials are having a profound impact on electric powertrains. Nano-materials enhance motor efficiency by significantly reducing weight and improving thermal management. For example, materials like graphene and carbon nanotubes contribute to lighter motor components and better heat dissipation, which leads to improved efficiency and extended vehicle range. Smart materials increase component adaptability and durability, allowing powertrains to maintain optimal performance under various environmental conditions.

The use of additive manufacturing and digital twins represents a transformative shift in design practices. Additive manufacturing allows for the creation of complex geometries and customized components, enabling more innovative and efficient powertrain designs. This technology supports rapid prototyping, facilitating faster development and refinement of powertrain systems. Digital twins provide valuable insights through real-time simulations and performance analysis, enabling accurate predictions and optimizations of powertrain systems before physical implementation. This approach accelerates development and reduces costs.

Furthermore, predictive maintenance and adaptive control strategies are crucial for enhancing the reliability and efficiency of electric powertrains. Predictive maintenance reduces the risk of unexpected failures by enabling proactive

maintenance based on data-driven forecasts. Adaptive control algorithms adjust powertrain parameters dynamically, ensuring optimal performance under different driving conditions and balancing various performance factors in real-time. These advanced control strategies contribute to a more reliable and efficient operation of electric powertrains.

Table 4 illustrates additional examples of how these advancements are applied in current electric powertrain systems.

Table 4

**Practical Examples of Advanced Technologies in Current Electric Powertrain Systems**

Example	Technology	Practical Benefits
Motor Components	Nano-materials	Reduced weight, improved efficiency, enhanced thermal management
Prototyping and Testing	Additive manufacturing	Faster development cycles, ability to create complex geometries
System Optimization	Digital twins	Accurate performance simulation, real-time design refinement
Maintenance and Control	Predictive maintenance	Reduced downtime, increased system reliability

*Source: created by the author*

Nano-materials used in motor components lead to substantial weight reduction and improved efficiency. Materials such as graphene and carbon nanotubes enhance thermal management and motor performance, resulting in more efficient powertrain systems with greater driving range and reliability. Additive manufacturing accelerates the development process by enabling rapid prototyping and the creation of complex component geometries. This technology allows for quicker testing and refinement of powertrain designs, leading to more innovative solutions. Digital twins provide virtual simulations that enhance system optimization by allowing real-time performance analysis and adjustments. Predictive maintenance algorithms reduce downtime and extend the lifespan of powertrain components, while advanced control strategies ensure optimal performance by dynamically adjusting to real-time conditions.

The integration of thermal management systems within electromechanical components is essential to improving the efficiency and extending the lifespan of electric powertrains. As the adoption of electric vehicles continues to grow, the demand for more effective thermal management has intensified. Electromechanical components, such as batteries, motors, and power electronics, generate significant heat during operation, which, if not properly managed, can lead to decreased performance and premature failure. Advanced thermal management systems are designed to maintain these components within their optimal temperature ranges, thereby ensuring consistent performance and longevity. In Table 5, Thermal Management Techniques for Electromechanical Components, the various techniques applied to essential components such as batteries, electric motors, and power electronics are detailed. These methods are integral to maintaining optimal performance and extending component lifespan.

Table 5

**Thermal Management Techniques for Electromechanical Components**

Electromechanical Component	Thermal Management Techniques	Benefits
Battery Systems	Phase change materials (PCM), liquid cooling, thermal interface materials	Maintains optimal temperature ranges, enhances energy efficiency, prolongs battery life, and prevents thermal runaway
Electric Motors	Direct cooling, advanced heat exchangers, thermal coatings	Improves thermal conductivity, prevents overheating, extends operational lifespan, and maintains high performance under demanding conditions
Power Electronics	Wide-bandgap semiconductors, integrated heat sinks, passive cooling	Reduces thermal losses, enhances power conversion efficiency, ensures long-term reliability, and minimizes the need for active cooling solutions

*Source: created by the author based on [4, 7, 10, 13]*

In contemporary electric vehicles, the application of these thermal management techniques is critical to the overall performance and durability of the powertrain. For battery systems, the integration of phase change materials (PCM) and liquid cooling helps manage thermal spikes during charging and discharging cycles. This is particularly important for maintaining consistent battery performance and preventing thermal runaway, a dangerous condition where excessive heat leads to uncontrollable reactions within the battery cells. By keeping the battery within its optimal temperature range, these techniques not only enhance energy efficiency but also significantly extend the battery’s operational life.

Electric motors, which are subject to high temperatures during operation, benefit from direct cooling methods and the use of advanced heat exchangers. These systems enhance thermal conductivity, allowing heat to be efficiently dissipated from the motor’s core. Thermal coatings further improve the motor’s ability to manage heat, ensuring that it operates efficiently even under high-load conditions. This results in an extended operational lifespan for the motor, reducing the likelihood of overheating and mechanical wear.

Power electronics, which manage the flow and conversion of electrical energy within the vehicle, require effective thermal management to ensure their reliability and efficiency. Wide-bandgap semiconductors, with their superior



thermal properties, are increasingly used in these systems to reduce heat generation during power conversion processes. Integrated heat sinks and passive cooling solutions complement these semiconductors by further reducing thermal losses. In modern electric vehicles, these advancements contribute to more efficient power management and reduce the need for complex active cooling systems, ultimately enhancing the reliability and longevity of power electronic components.

In Table 6 we delve into specific technologies like liquid cooling systems and integrated heat sinks, which are crucial for managing heat in high-performance electric vehicles.

Table 6

**Key Thermal Management Technologies in Modern Electric Vehicles**

Thermal Management Technology	Description	Application in Modern Electric Vehicles
Liquid Cooling Systems	Circulates coolant through components to absorb and dissipate heat	Widely used in batteries and motors to manage heat in high-performance electric vehicles, ensuring consistent operation
Thermal Interface Materials	Materials placed between components to improve heat transfer efficiency	Applied between power electronics and heat sinks to enhance thermal conductivity and prevent overheating
Integrated Heat Sinks	Structures designed to increase surface area for heat dissipation	Used in power electronics to dissipate heat generated during energy conversion, reducing thermal stress on components.

*Source: created by the author*

Liquid cooling systems are particularly effective in high-performance applications, where they circulate coolant through critical components like batteries and motors to absorb and dissipate heat. This ensures that these components remain within their optimal temperature ranges, even during intensive use, thereby maintaining consistent operation and preventing overheating.

Thermal interface materials are used to enhance the thermal conductivity between components, such as between power electronics and heat sinks. By improving heat transfer efficiency, these materials help prevent overheating and ensure that the power electronics can operate reliably over extended periods. Integrated heat sinks, which are designed to increase the surface area for heat dissipation, are commonly used in power electronics to manage the heat generated during energy conversion processes. By reducing thermal stress on these components, integrated heat sinks help to extend their operational life and improve the overall efficiency of the powertrain.

Evaluating the challenges and limitations associated with the integration of electromechanical systems in electric powertrains is essential for understanding their potential impact on scalability, cost, and reliability. As electric vehicles (EVs) become more prevalent, the demand for more efficient and reliable powertrains increases. However, the integration of advanced electromechanical systems into these powertrains presents several obstacles that must be addressed to ensure widespread adoption and long-term sustainability.

One of the primary challenges in integrating electromechanical systems is scalability. The need to scale up production to meet the growing demand for electric vehicles introduces significant complexities. Manufacturing processes for high-performance components must be optimized to achieve consistent quality at larger volumes, which can be difficult given the precision required in electromechanical systems. Moreover, scalability is closely tied to cost. As production scales, manufacturers must balance the need to reduce costs while maintaining or improving the quality and performance of components. This requires innovation in both materials and manufacturing techniques to achieve economies of scale without compromising reliability.

Another critical challenge is the cost associated with integrating electromechanical systems. The development and production of high-quality components involve significant investments in research and development, as well as in specialized manufacturing processes. While advances in technology can lead to cost reductions over time, the initial investment can be prohibitive, especially for smaller manufacturers. Additionally, the cost of raw materials, particularly those that are rare or require complex processing, can significantly impact the overall cost of the powertrain. The challenge lies in finding cost-effective solutions that do not compromise the performance and reliability of the system.

Reliability is another major concern in the integration of electromechanical systems. As these systems become more complex, ensuring their long-term reliability becomes increasingly challenging. Electromechanical components are subject to various stresses, including thermal, mechanical, and electrical, which can lead to wear and failure over time. Ensuring the reliability of these systems requires rigorous testing and validation processes, as well as the development of robust designs that can withstand the demanding conditions of automotive applications. Moreover, the integration of new technologies introduces uncertainties that must be carefully managed to avoid unforeseen failures.

The table 7 provides an overview of these challenges and limitations, highlighting their impact on the development and deployment of electromechanical systems in electric powertrains.

Table 7

**Key Challenges in Integrating Electromechanical Systems in Electric Powertrains**

Challenge/ Limitation	Description	Impact on Electric Powertrains
Scalability	Difficulties in scaling production while maintaining quality	Limits widespread adoption, affects economies of scale
Cost	High initial investments and material costs	Increases the overall cost of powertrains, potentially limiting market accessibility
Reliability	Ensuring long-term durability and performance	Requires rigorous testing, affects consumer confidence and system longevity

*Source: created by the author*

Scalability poses a significant challenge, as increasing production to meet demand can lead to variations in quality and performance. To scale electromechanical systems effectively, manufacturers must develop processes that allow for consistent production at larger volumes while maintaining the precision required for high-performance components. This is particularly challenging in the context of electric powertrains, where even minor variations can impact overall system efficiency and reliability.

Cost is another critical limitation, as the integration of advanced electromechanical systems often requires expensive materials and specialized manufacturing processes. The high costs associated with these components can make electric powertrains less accessible to consumers, particularly in price-sensitive markets. To address this issue, manufacturers are exploring ways to reduce costs through material substitution, process optimization, and economies of scale. However, these strategies must be carefully implemented to avoid compromising the quality and reliability of the powertrain.

Reliability is a fundamental concern, as the failure of electromechanical components can lead to significant issues in electric powertrains. Ensuring reliability requires extensive testing and validation to identify potential failure modes and mitigate them through robust design and manufacturing practices. In modern electric vehicles, reliability is crucial for consumer acceptance, as any perceived or actual unreliability can hinder the adoption of electric powertrains. Advanced diagnostic and monitoring systems are being integrated to predict and prevent failures, but these solutions add complexity and cost to the system.

The integration of electromechanical systems into electric powertrains is essential for advancing the efficiency, reliability, and sustainability of next-generation electric vehicles. These systems must be optimized not only for performance but also for their scalability, cost-effectiveness, and environmental impact. As the automotive industry continues to shift towards electric mobility, it is critical to address the challenges associated with the design, implementation, and scalability of these systems. This will involve innovative approaches in materials, control algorithms, and manufacturing processes, all aimed at reducing costs while enhancing overall system performance and sustainability (table 8).

Table 8

**Key Recommendations for Advancing Electromechanical Systems in Electric Powertrains**

Recommendation	Area of Focus	Description	Expected Outcome
Material Innovation	Design	Develop lightweight, recyclable materials to reduce weight and environmental impact	Improved efficiency and sustainability
Advanced Control Algorithms	Design	Implement algorithms that optimize system performance under varying conditions	Enhanced performance and energy efficiency
Precision Manufacturing	Implementation	Refine manufacturing processes to ensure consistency and reliability of components	Increased reliability and reduced failure rates
Standardization and Modular Design	Scalability	Standardize components and develop modular systems for easier scalability	Lower costs and greater adaptability
Collaborative R&D	Implementation	Foster collaboration among stakeholders to align practices with industry standards	Accelerated innovation and improved implementation

*Source: created by the author*

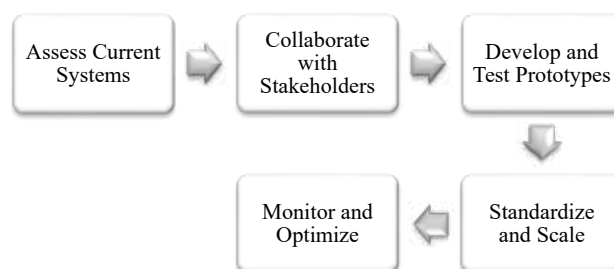
The table above outlines a set of targeted recommendations designed to improve the design, implementation, and scalability of electromechanical systems in electric powertrains. Material innovation is central to these efforts, focusing on developing lightweight and recyclable materials that not only reduce the overall weight of the vehicle but also contribute to sustainability goals. This is especially important in the context of electric vehicles, where efficiency and environmental impact are closely linked.

Advanced control algorithms are another critical area, offering the potential to optimize the performance of electromechanical systems by adapting to various operational conditions. These algorithms can ensure that the powertrain operates at peak efficiency, which is vital for maximizing the range and performance of electric vehicles.

Precision in manufacturing is essential to ensure that the components of these systems are produced to the highest standards, minimizing the risk of failure and extending the lifespan of the powertrain. Standardization and modular design further enhance scalability, allowing manufacturers to produce these systems more cost-effectively and adapt to changing market demands.

Collaborative research and development (R&D) is also crucial, bringing together various stakeholders to innovate and implement best practices that align with industry standards. This approach helps to ensure that electromechanical systems are not only cutting-edge but also practical and reliable for widespread use in the automotive industry.

To effectively implement these recommendations, the following step-by-step algorithm is proposed (Fig. 1)



**Fig. 1. Implementation Algorithm for Enhancing Electromechanical Systems in Electric Powertrains**

Source: created by the author

This algorithm begins with a comprehensive assessment of current systems, identifying key areas for improvement. By collaborating with a diverse group of stakeholders, including material scientists and engineers, the industry can leverage innovative solutions that address both technical and economic challenges. Prototyping and rigorous testing are crucial steps in ensuring that these innovations meet the required standards of performance and reliability. Standardization and modular design are pivotal in achieving scalability, reducing costs, and allowing for flexibility in production. Finally, continuous monitoring and optimization ensure that these systems remain at the forefront of technological advancement, ready to meet the demands of the evolving electric vehicle market.

### Conclusions

The article has established that the development of next-generation electric powertrains is a critical aspect of ensuring the sustainability and efficiency of modern transportation systems. The identified challenges include the integration of electromechanical systems, particularly in terms of scalability, cost, and reliability. Despite significant advancements in the use of advanced materials, design technologies, and control algorithms, the issues of further cost reduction and enhancing the reliability of electric powertrain components remain crucial.

Future research could focus on improving thermal management techniques to reduce losses and enhance the efficiency of electric powertrains, as well as developing more adaptive control algorithms capable of responding dynamically to changing operating conditions. Additionally, further exploration of new materials and the refinement of manufacturing processes are promising areas for increasing scalability and reducing costs.

### Bibliography

1. Review and Development of Electric Motor Systems and Electric Powertrains for New Energy Vehicles / W. Cai et al. *Automotive Innovation*. 2021. Vol. 4, no. 1. P. 3–22. URL: <https://doi.org/10.1007/s42154-021-00139-z> (date of access: 28.08.2024).
2. Benzaquen J., He J., Mirafzal B. Toward more electric powertrains in aircraft: technical challenges and advancements. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*. 2021. Vol. 5, no. 3. P. 177–193. URL: <https://doi.org/10.30941/CESTEMS.2021.00022> (date of access: 28.08.2024).
3. Powertrain Design and Control in Electrified Vehicles: A Critical Review / X. Hu et al. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2021. Vol. 7, no. 3. P. 1990–2009. URL: <https://doi.org/10.1109/tte.2021.3056432> (date of access: 28.08.2024).
4. Multiphase Motors and Drive Systems for Electric Vehicle Powertrains: State of the Art Analysis and Future Trends / M. A. Frikha et al. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 2. P. 768. URL: <https://doi.org/10.3390/en16020768> (date of access: 28.08.2024).
5. Architectures of Planetary Hybrid Powertrain System: Review, Classification and Comparison / L. Wang et al. *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 2. P. 329. URL: <https://doi.org/10.3390/en13020329> (date of access: 28.08.2024).
6. Evolving Electric Mobility: In-Depth Analysis of Integrated Electronic Control Unit Development in Electric Vehicles / S. S. A. Naqvi et al. *IEEE Access*. 2024. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3356598> (date of access: 28.08.2024).
7. The impact of disruptive powertrain technologies on energy consumption and carbon dioxide emissions from heavy-duty vehicles / A. Smallbone et al. *Energy Conversion and Management: X*. 2020. Vol. 6. P. 100030. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100030> (date of access: 28.08.2024).

8. Automotive Electric Propulsion Systems: A Technology Outlook / B. Fahimi et al. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2023. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/tte.2023.3321707> (date of access: 28.08.2024).
9. Hua X., Thomas A., Shultis K. Recent progress in battery electric vehicle noise, vibration, and harshness. *Science Progress*. 2021. Vol. 104, no. 1. P. 003685042110052. URL: <https://doi.org/10.1177/00368504211005224> (date of access: 28.08.2024).
10. Reliability of Power Electronic Systems for EV/HEV Applications / F. Blaabjerg et al. *Proceedings of the IEEE*. 2020. P. 1–17. URL: <https://doi.org/10.1109/jproc.2020.3031041> (date of access: 28.08.2024).
11. Medium and Heavy Duty Vehicle Electrification: Trends and Technologies / A. Hasnain et al. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2024. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/tte.2024.3444692> (date of access: 28.08.2024).
12. Ramanath A. Automotive applications of power electronics. *Handbook of Power Electronics in Autonomous and Electric Vehicles*. Academic Press. 2024. P. 193–210. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99545-0.00015-4>
13. Song Z., Chunhua L. Energy efficient design and implementation of electric machines in air transport propulsion system. *Applied Energy*. 2022. No. 322. P. 119472. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119472>
14. Thermal Management of Electrified Propulsion System for Low-Carbon Vehicles / B. Li et al. *Automotive Innovation*. 2020. Vol. 3, no. 4. P. 299–316. URL: <https://doi.org/10.1007/s42154-020-00124-y> (date of access: 28.08.2024).
15. Power Electronic Converters in Electric Aircraft: Current Status, Challenges, and Emerging Technologies / L. Dorn-Gomba et al. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2020. Vol. 6, no. 4. P. 1648–1664. URL: <https://doi.org/10.1109/tte.2020.3006045> (date of access: 28.08.2024).

### References

1. Cai, W., et al. (2021). Review and Development of Electric Motor Systems and Electric Powertrains for New Energy Vehicles. *Automotive Innovation*, no. 4, pp. 3-22. URL: <https://doi.org/10.1007/s42154-021-00139-z> (date of access: 28.08.2024).
2. Benzaquen, J., He, J., & Mirafzal, B. (2021). Toward More Electric Powertrains in Aircraft: Technical Challenges and Advancements. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, no. 5(3), pp. 177-193. URL: <https://doi.org/10.30941/CESTEMS.2021.00022> (date of access: 28.08.2024).
3. Hu, X., et al. (2021). Powertrain Design and Control in Electrified Vehicles: A Critical Review. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, no. 7(3), pp. 1990-2009. URL: <https://doi.org/10.1109/TTE.2021.3056432> (date of access: 28.08.2024).
4. Frikha, M., et al. (2023). Multiphase Motors and Drive Systems for Electric Vehicle Powertrains: State of the Art Analysis and Future Trends. *Energies*, no. 16(2), p. 768. URL: <https://doi.org/10.3390/en16020768> (date of access: 28.08.2024).
5. Wang, L., et al. (2020). Architectures of Planetary Hybrid Powertrain System: Review, Classification and Comparison. *Energies*, no. 13(2), p. 329. URL: <https://doi.org/10.3390/en13020329> (date of access: 28.08.2024).
6. Naqvi, S., et al. (2024). Evolving Electric Mobility: In-Depth Analysis of Integrated Electronic Control Unit Development in Electric Vehicles. *IEEE Access*. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3356598> (date of access: 28.08.2024).
7. Smallbone, A., et al. (2020). The Impact of Disruptive Powertrain Technologies on Energy Consumption and Carbon Dioxide Emissions from Heavy-Duty Vehicles. *Energy Conversion and Management: X*, no. 6, p. 100030. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100030> (date of access: 28.08.2024).
8. Fahimi, B., et al. (2023). Automotive Electric Propulsion Systems: A Technology Outlook. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. URL: <https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3321707> (date of access: 28.08.2024).
9. Hua, X., Thomas, A., & Shultis, K. (2021). Recent Progress in Battery Electric Vehicle Noise, Vibration, and Harshness. *Science Progress*, no. 104(1). URL: <https://doi.org/10.1177/00368504211005224> (date of access: 28.08.2024).
10. Blaabjerg, F., et al. (2020). Reliability of Power Electronic Systems for EV/HEV Applications. *Proceedings of the IEEE*, no. 109(6), pp. 1060-1076. URL: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.3031041> (date of access: 28.08.2024).
11. Hasnain, A., et al. (2024). Medium and Heavy Duty Vehicle Electrification: Trends and Technologies. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. URL: <https://doi.org/10.1109/TTE.2024.3444692> (date of access: 28.08.2024).
12. Ramanath, A. (2024). Automotive Applications of Power Electronics. *Handbook of Power Electronics in Autonomous and Electric Vehicles*, no. 6, pp. 193-210. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99545-0.00015-4> (date of access: 28.08.2024).
13. Song, Z., & Chunhua, L. (2022). Energy Efficient Design and Implementation of Electric Machines in Air Transport Propulsion System. *Applied Energy*, no. 322, p. 119472. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119472> (date of access: 28.08.2024).
14. Li, B., et al. (2020). Thermal Management of Electrified Propulsion System for Low-Carbon Vehicles. *Automotive Innovation*, no. 3, pp. 299-316. URL: <https://doi.org/10.1007/s42154-020-00124-y> (date of access: 28.08.2024).
15. Dorn-Gomba, L., et al. (2020). Power Electronic Converters in Electric Aircraft: Current Status, Challenges, and Emerging Technologies. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, no. 6, pp. 1648-1664. URL: <https://doi.org/10.1109/TTE.2020.3006045> (date of access: 28.08.2024).

Н. В. ТАРЕЛЬНИК

кандидат економічних наук, доцент  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-6304-6925

## УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ НАСОСІВ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

В статті розглядається проблема зчеплення і залипання електроду-інструменту (ЕІ) (аноду) з поверхнею деталі, яку легують (катоду). Особливо це проявляється коли необхідно проводити електроіскрове легування (ЕІЛ) деталей з корозійностійких нержавіючих сталей, які переважною більшістю використовуються в насосах на атомних електростанціях (АЕС). При збільшенні енергії розряду ( $W_p$ ), при легуванні на більш «грубих» режимах ЕІЛ проблема стає більш актуальною. З метою проведення порівняльних випробувань на установці електроіскрового легування моделі «Елітрон 52А» проводили обробку 3-х партій зразків, розміром 15x15x8 мм зі сталі 12X18H10T. В якості ЕІ використовували стержні Ø3 мм і L=30 мм з сталі 12X18H10T і нікелю. В першій партії зразки нічим попередньо не оброблялись. В другій партії зразки попередньо обробляли графітовим ЕІ, а в третій – поверхню, що легують, натирали порошком з дисульфиду молібдену. В результаті проведення досліджень удосконалена технологія ЕІЛ корозійностійких сталей, що використовують для виготовлення деталей обладнання АЕС при якій на поверхню, що легують, шляхом натирання (намазування) наносять порошок дисульфиду молібдену, що різко покращує процес легування за рахунок усунення зчеплення (прилипання) електродів. В цьому випадку при будь-яких значеннях енергії розряду при ЕІЛ зчеплення (прилипання) електродів аноду і катоду відсутнє. При порівнянні різних способів ЕІЛ сталі 12X18H10T ЕІ зі сталі 12X18H10T встановлено, що при ЕІЛ без попередньої обробки поверхні зразка, в порівнянні з попередньою обробкою поверхні графітом і дисульфідом молібдену, при однакових значеннях енергії розряду, продуктивність, відповідно в 35 і 44 раз менше, шорсткість в 1,7 і 2,0 раз більше, а суцільність в 1,3 і 1,5 раз менше. При порівнянні різних способів ЕІЛ сталі 12X18H10T ЕІ з нікелю, встановлено, що при ЕІЛ без попередньої обробки поверхні зразка, в порівнянні з попередньою обробкою поверхні графітом і дисульфідом молібдену, при однакових значеннях енергії розряду, продуктивність, відповідно в 177 і 197 раз менше, шорсткість в 2,1 і 2,5 раз більше, а суцільність в 1,9 і 2,1 раз менше.

**Ключові слова:** електроіскрове легування, енергія розряду, продуктивність, електрод-інструмент, анод, катод, шорсткість, суцільність.

N. V. TARELNYK

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Technical System Designs  
Sumy National Agrarian University  
ORCID: 0000-0002-6304-6925

## IMPROVING THE TECHNOLOGY OF ELECTRO-SPARK ALLOYING THE COMPONENT PARTS FOR THE PUMPS OF NUCLEAR POWER PLANTS

The paper deals with the technical challenge of seizing and sticking the tool electrode (TE) (anode) to the surface of the part (cathode) being alloyed. This is especially evident when it is necessary to carry out the electrospark alloying (ESA) process referring the parts made of corrosion-resistant stainless steels, which are mostly used in the pumps at nuclear power plants (NPP). The issue becomes more urgent while alloying under the so-called "coarse" ESA modes when the discharge energy ( $W_p$ ) increases. To conduct the comparative tests, at the Елітрон 52А (Elytron 52A) model electrospark alloying unit, three (3) batches of 15x15x8 mm steel 12X18H10T (12Kh18N10T) samples were processed. The rods of Ø3 mm and L = 30 mm made of steel 12X18H10T (12Kh18N10T) and nickel were used as the TE. For the first batch, the samples were not pre-treated. For the second batch, the samples were pre-treated with a graphite TE, and for the third one, the surface to be alloyed was rubbed with molybdenum disulfide powder. The result of the research has become an improved ESA technology for processing the corrosion-resistant steels, which are used to manufacture the NPP equipment parts. According to this technology, molybdenum disulfide powder is applied by rubbing (smearing) to the surface to be alloyed. This dramatically improves the alloying process due to elimination of seizing (sticking) of the electrodes. In this case, at any values of the discharge energy while the ESA process, there is no seizing (sticking) events as for the anode and cathode electrodes. When comparing different processes by the ESA method of steel 12X18H10T (12Kh18N10T) with the use of the TE made of steel 12X18H10T (12Kh18N10T), it has been found that at the ESA method without pre-treatment of the surface of the sample, in comparison with the process including the pre-treatment of the surface with graphite and molybdenum disulfide, at the same values of discharge energy, respectively, the productivity is 35 and 44 times less, respectively, the roughness is 1.7 and 2.0 times more, and respectively, the continuity is 1.3 and

1.5 times less. When comparing different ESA methods for processing steel 12X18H10T (12Kh18N10T) by the TE made of nickel, it has been stated that at the ESA process without pre-treatment of the sample surfaces, in comparison with pre-treatment of the above surfaces with graphite and molybdenum disulfide, at the same values of the discharge energy, the productivity is 177 and 197 times less, respectively, the roughness is 2.1 and 2.5 times more, respectively, and the continuity is 1.9 and 2.1 times less, respectively.

**Key words:** electrospark alloying, discharge energy, productivity, tool electrode, anode, cathode, roughness, continuity.

### Постановка проблеми

Розвиток електроенергетики супроводжується появою нового енергетичного обладнання серед якого значну кількість займають насоси різного призначення. Специфічні вимоги, які висуваються до насосів різних технологічних систем атомних електростанцій (АЕС), серед яких основними є забезпечення надійності, ефективності і захисту оточуючого середовища від забрудненості, а також особливості умов їх роботи потребують відокремлювання їх в окрему галузь насособудівництва.

Характерною особливістю роботи насосів АЕС є негативний вплив оточуючого середовища: високий тиск і температура, відповідно до  $P = 16,6$  МПа і  $t = 289$  °С та радіаційне опромінювання [1]. В зв'язку з цим деталі насосів АЕС виготовляють з корозійностійких нержавіючих сталей. Всі деталі і вузли насосів, що стикаються з теплоносієм і які охолоджуються водою промконтур та запираючою водою, виготовлені зі сталей, стійких до корозії і ерозії [2].

Насособудівництво – галузь яка дуже швидко розвивається. З появою нових і модернізацією існуючих насосів з більш високими параметрами з'являється необхідність в появі нових і більш якісних матеріалів. Такими матеріалами можуть бути композиційні, які складаються з в'язкої основи і зносостійкого захисного покриття. Одним з більш прогресивних сучасних методів нанесення захисних покриттів є екологічно безпечний і енергоефективний метод електроіскрового легування (ЕІЛ) Характерні особливості методу ЕІЛ: міцне зчеплення нанесеного матеріалу з основою, локальність дії, можливість нанесення любых струмопровідних матеріалів тощо дає можливість справедливо займати йому достойне місце серед сучасних відновлюючих і зміцнюючих технологій [3].

До недоліків методу ЕІЛ можна віднести зчеплення і залипання його електроду-інструменту (ЕІ) (аноде) з поверхнею деталі, яку легують (катоду). Особливо це проявляється коли необхідно проводити ЕІЛ деталей з корозійностійких нержавіючих сталей, які переважно більшістю використовуються в насосах на АЕС. При збільшенні енергії розряду ( $W_p$ ), при легуванні на більш «грубих» режимах ЕІЛ, які характеризуються напругою 100–200 В і великою ємністю конденсаторної батареї (100–300 мкФ) [4] проблема стає більш актуальною.

Слід відмітити, що при зчепленні і залипання електродів аноду і катоду зменшуються параметри якості поверхневих шарів, нанесених при легуванні покриттів: шорсткості, суцільності і рівномірності. Крім цього значно зменшується продуктивність процесу ЕІЛ.

### Формулювання мети дослідження

Таким чином, метою роботи є удосконалення технології ЕІЛ деталей з корозійних нержавіючих сталей АЕС, за рахунок підвищення продуктивності та покращення параметрів якості їх поверхонь (шорсткості, суцільності і рівномірності), шляхом усунення зчеплення (прилипання) електродів-інструментів з поверхнею деталі, яку легують.

### Викладення основного матеріалу дослідження

В попередніх дослідженнях [5] відмічалось, що при відновленні деталей з нержавіючих сталей, які застосовують на АЕС, при використанні ЕІ з нержавіючої сталі 12X18H10T або нікелю при застосуванні енергії розряду  $W_p > 0,13$  Дж, відбувається їх прилипання до оброблюваної поверхні, що, у свою чергу, призводить до зниження якості нанесеного покриття (підвищення шорсткості і зменшення суцільності і рівномірності нанесеного шару), а також зниження продуктивності процесу.

Для усунення проблеми було запропоновано наносити покриття на зношену поверхню у два етапи [6]. При цьому перед першим етапом нанесення покриття металевим ЕІ на зношену сталюю поверхню методом ЕІЛ наносять шар покриття графітовим ЕІ з енергією розряду  $W_p = 0,02$  Дж і продуктивністю,  $Q = 0,3$  см<sup>2</sup>/хв. Перший етап нанесення шару покриття на отриману поверхню виконують металевим ЕІ при  $W_p = 0,20$ – $0,55$  Дж і  $Q = 1,6$ – $2,5$  см<sup>2</sup>/хв, після чого отриману поверхню піддають другому етапу нанесення шару покриття тим же металевим ЕІ з  $W_p = 0,55$ – $0,90$  Дж і  $Q = 2,5$ – $3,4$  см<sup>2</sup>/хв. В результаті проведених досліджень [5, 6] залипання частково зменшилось.

В подальших дослідженнях для повного усунення залипання електродів, запропонований новий спосіб [7] при якому на поверхню, що легують, шляхом натирання (намазування) наносять порошок дисульфиду молібдену, що різко покращує процес легування за рахунок усунення зчеплення (прилипання) електродів. В цьому випадку при будь-яких значеннях енергії розряду при ЕІЛ зчеплення (прилипання) електродів аноду і катоду відсутнє.

З метою проведення порівняльних випробувань на установці електроіскрового легування моделі «Елітрон 52А» (рис. 1) проводили обробку 3-х партій зразків, розміром 15x15x8 мм зі сталі 12X18H10T (рис. 2, а). В якості ЕІ використовували стержні Ø3 мм і L = 30 мм з сталі 12X18H10T і нікелю. В першій партії зразки нічим попередньо не оброблялись (рис. 2, б). В другій партії зразки попередньо обробляли графітовим ЕІ (рис. 2, в), а в третій – поверхню, що легують, натирали порошком з дисульфиду молібдену (рис. 2, г).



а

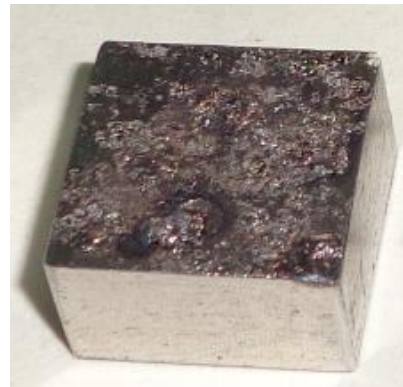


б

Рис. 1. Фотографія установки «Елітрон 52А» (а)  
і профілографа-профілометра мод. 201 заводу 2Еалібр» (б)



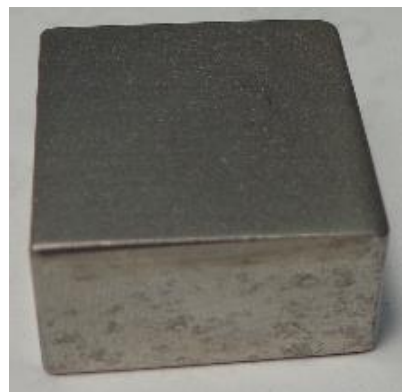
а



б



в



г

Рис. 2. Зразки сталі 12X18H10T: а – без покриття, б – без попередньої обробки і ЕІЛ сталю 12X18H10T,  
в – після ЕІЛ графітом і сталю 12X18H10T, г – після натирання порошком дисульфіду молібдену  
і ЕІЛ сталю 12X18H10T

При ЕІЛ зразка зі сталі 12Х18Н10Т ЕІ зі сталі 12Х18Н10Т і нікелем без попередньої обробки енергія розряду змінювалась з 0,04 до 0,9 Дж, а при обробці графітом і порошком дисульфиду молібдену, відповідно з 0,04 до 0,9 Дж і з 0,55 до 0,9 Дж. Шорсткість поверхонь зразків з покриттями і без покриття оцінювали за допомогою профілографа-профілометра заводу Калібр.

Результати параметрів якості при ЕІЛ поверхневого шару сталі 12Х18Н10Т ЕІ з сталі 12Х18Н10Т і нікелю зведені в табл. 1.

Таблиця 1

**Результати параметрів якості поверхні при ЕІЛ сталі 12Х18Н10Т ЕІ з сталі 12Х18Н10Т і нікелю**

Енергія розряду, $W_p$ , Дж	Продуктивність, $cm^2/xv$	Матеріал		Шорсткість, $Rz$ , мкм	Суцільність, %
		Анод	Катод		
Без попередньої обробки поверхні зразка					
0,04	0,1	Сталь 12Х18Н10Т	Сталь 12Х18Н10Т	16	85
0,11	0,07			27	80
0,20	0,05			49	70
0,35	0,03			72	60
0,55	0,02			81	50
0,90	0,01			97	45
0,04	0,15	Нікель	Сталь 12Х18Н10Т	15	90
0,11	0,08			24	80
0,20	0,06			43	70
0,35	0,03			65	65
0,55	0,02			79	50
0,90	0,01			93	45
Обробка поверхні зразка ЕІЛ графітом					
0,02	0,3	Графіт	Сталь 12Х18Н10Т	1	100
0,04	0,4	Сталь 12Х18Н10Т	Сталь 12Х18Н10Т	7	100
0,11	1,5			12	95
0,20	1,6			19	90
0,35	1,6			41	80
0,55	2,0			51	70
0,90	2,7			62	60
0,02	0,3	Графіт	Сталь 12Х18Н10Т	1	100
0,55	2,3	Нікель	Сталь 12Х18Н10Т	38	100
0,90	3,0			49	85
Обробка поверхні зразка порошком дисульфиду молібдену					
0,04	0,4	Сталь 12Х18Н10Т	Сталь 12Х18Н10Т	4	100
0,11	1,7			9	100
0,20	2,0			11	100
0,35	2,3			31	100
0,55	2,5			41	100
0,90	3,4			52	100
0,55	2,5	Нікель	Сталь 12Х18Н10Т	31	100
0,90	3,4			42	100

В результаті аналізу таблиці встановлено, що при ЕІЛ сталі 12Х18Н10Т ЕІ зі сталі 12Х18Н10Т і нікелю без попередньої обробки поверхні зразка графітом або порошком дисульфиду молібдену при зростанні енергії розряду  $W_p$  з 0,04 до 0,35 Дж продуктивність ЕІЛ знижувалась відповідно з 0,1 до 0,01 і з 0,15 до 0,03  $cm^2/xv$ , шорсткість  $Rz$  збільшувалась з 16 до 72 і з 15 до 65 мкм, суцільність зменшувалась з 85 до 60 і з 90 до 65 %. При ЕІЛ поверхні зразка зі сталі 12Х18Н10Т ЕІ зі сталі 12Х18Н10Т з попередньою обробкою поверхні зразка графітом при зростанні енергії розряду з 0,04 до 0,9 Дж, продуктивність ЕІЛ збільшувалась відповідно з 0,4 до 2,7  $cm^2/xv$ ; шорсткість,  $Rz$  збільшується з 7 до 62 мкм; суцільність зменшувалась з 100 до 60 %. При ЕІЛ поверхні зразка зі сталі 12Х18Н10Т ЕІ з нікелю з попередньою обробкою поверхні зразка графітом при зростанні енергії розряду з 0,55 до 0,9 Дж, продуктивність ЕІЛ збільшувалась відповідно з 2,3 до 3,0  $cm^2/xv$ , шорсткість  $Rz$  збільшувалась з 38 до 49 мкм, суцільність зменшувалась з 100 до 85 %. При ЕІЛ поверхні зразка зі сталі 12Х18Н10Т ЕІ зі сталі 12Х18Н10Т з попередньою обробкою поверхні зразка натиранням порошком дисульфиду молібдену при зростанні енергії розряду з 0,04 до 0,9 Дж продуктивність ЕІЛ збільшувалась відповідно з 0,4 до 3,4  $cm^2/xv$ , шорсткість  $Rz$  збільшувалась з 4 до 52 мкм, суцільність при всіх значеннях енергії розряду становила 100 %. При ЕІЛ поверхні



зразка зі сталі 12X18N10T EI з нікелю, з попередньою обробкою поверхні зразка натиранням порошком дисульфиду молібдену, при зростанні енергії розряду з 0,55 до 0,9 Дж, продуктивність ЕІЛ збільшується відповідно з 2,5 до 3,4 см<sup>2</sup>/хв; шорсткість, Rz збільшується з 31 до 42 мкм; суцільність при всіх значеннях енергії розряду становила 100 %.

#### Висновки

1. Удосконалена технологія ЕІЛ корозійностійких сталей, що використовують для виготовлення деталей обладнання АЕС при якій на поверхню, що легують, шляхом натирання (намазування) наносять порошок дисульфиду молібдену, що різко покращує процес легування за рахунок усунення зчеплення (прилипання) електродів. В цьому випадку при будь-яких значеннях енергії розряду при ЕІЛ зчеплення (прилипання) електродів аноду і катоду відсутнє.

2. При порівнянні різних способів ЕІЛ сталі 12X18N10T EI зі сталі 12X18N10T встановлено, що при ЕІЛ без попередньої обробки поверхні зразка, в порівнянні з попередньою обробкою поверхні графітом і дисульфідом молібдену, при однакових значеннях енергії розряду, продуктивність, відповідно в 35 і 44 раз менше, шорсткість в 1,7 і 2,0 раз більше, а суцільність в 1,3 і 1,5 раз менше.

3. При порівнянні різних способів ЕІЛ сталі 12X18N10T EI з нікелю, встановлено, що при ЕІЛ без попередньої обробки поверхні зразка, в порівнянні з попередньою обробкою поверхні графітом і дисульфідом молібдену, при однакових значеннях енергії розряду, продуктивність, відповідно в 177 і 197 раз менше, шорсткість в 2,1 і 2,5 раз більше, а суцільність в 1,9 і 2,1 раз менше.

#### Acknowledgement

Результати частково отримано в рамках науково-дослідного проекту «Розробка екологічно безпечних технологій модифікації поверхні деталей обладнання електростанцій комбінованими методами, заснованими на електроіскровому легуванні» за фінансування Міністерства освіти і науки України (держ. реєстр. № 0124U000539, Сумський державний університет).

#### Список використаної літератури

1. Насосне устаткування в технологічній схемі АЕС. Режим доступу: <https://vseosvita.ua/library/embed/0100a91v-0886.docx.html>

2. Чалий Д.О., Тарнавський А.Б., Сукач Р.Ю., Веселівський Р.Б. Техногенна безпека АЕС: Навч. посібн.; Ч. II; Держ. служба України з надзвичайних ситуацій; Львів. держ. ун-т безпеки життєдіяльності. Львів: Каменяр, 2020. 340 с.

3. Tarelnyk V.B. Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kh18N10T Steel Using a Combined Technology Based on Electrospark Alloying / V.B. Tarelnyk, O.P. Gaponova, V.B. Loboda, E.V. Konoplyanchenko, V.S. Martsinkovskii, Yu.I. Semirnenko, N.V. Tarelnyk, M.A. Mikulina, B.A. Sarzhanov // *Surf. Engin. Appl. Electrochem.* 2021. № 57, P. 173–184.

4. Глушко С.П. Дослідження технології електроіскрового нанесення покриттів, легування та зміцнення / С.П. Глушко // *Advanced Engineering Research*. 2021. № 21 (3). С. 253–259.

5. Пат. України на корисну модель 150213. Спосіб відновлення зношених поверхонь сталених деталей обладнання, яке підлягає радіаційному опроміненню. Тарельник Н.В. заяв. № у 202105262; опубл. 12.01.2022, Бюл. № 2.

6. Tarelnyk N.V., Properties of Surfaces Parts from X10CrNiTi18-10 Steel Operating in Conditions of Radiation Exposure Retailored by Electrospark Alloying. I. Features of Topography and Mechanical Properties of Coatings/ Tarelnyk N.V., *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2022. № 44 (8). P. 1037–1058. (in Ukrainian). DOI: 10.15407/mfint.44.08.1037

7. Пат. України на корисну модель 155134. Спосіб усунення зчеплення електродів при електроіскровому легуванні сталевих деталей обладнання, яке підлягає радіаційному опромінюванню. Тарельник Н.В. заяв. № у 2023 04455 (22); опубл. 17.01.2024, Бюл. № 3.

#### References

1. Nasosne ustatkuvannia v tekhnolohichnii skhemi AES [Pumping equipment in the technological scheme of nuclear power plants]. Retrieved from <https://vseosvita.ua/library/embed/0100a91v-0886.docx.html> [in Ukrainian].

2. Chalyi D.O., Tarnavskiy A.B., Sukach R.Iu., Veselivskiy R.B. (2020) *Tekhnohenna bezpeka AES [Man-made safety of nuclear power plants]*; Navch. posibn.; Ch. II; Derzh. sluzhba Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii; Lviv. derzh. un-t bezpeky zhyttiediialnosti. Lviv: Kameniar, 340 p. [in Ukrainian].

3. Tarelnyk V.B., Gaponova O.P., Loboda V.B., Konoplyanchenko E.V., Martsinkovskii V.S., Semirnenko Yu.I., Tarelnyk N.V., Mikulina M.A., Sarzhanov B.A. (2021) Improving Ecological Safety when Forming Wear-Resistant Coatings on the Surfaces of Rotation Body Parts of 12Kh18N10T Steel Using a Combined Technology Based on Electrospark Alloying. *Surf. Engin. Appl. Electrochem.*, 57, 173–184.

4. Hlushko S.P. (2021) Doslidzhennia tekhnolohii elektroiskrovoho nanesennia pokryttiv, lehuвання ta zmitsnennia [Research of the technology of electrospark coating, alloying and strengthening]. *Advanced Engineering Research*, 21 (3), p. 253–259. [in Ukrainian].
5. Tarel'nyk N.V. (2022). Pat. Ukrainy na korysnu model 150213. Sposib vidnovlennia znoshenykh poverkhon stalnykh detalei obladnannia, yake pidliahaie radiatsiinomu oprominenniu. Zaiav [The method of restoration of worn surfaces of steel parts of equipment subject to radiation exposure]. № u 202105262; opubl. 12.01.2022, Biul.№ 2.
6. Tarel'nyk N.V. (2022). Properties of Surfaces Parts from X10CrNiTi18-10 Steel Operating in Conditions of Radiation Exposure Retailored by Electrospark Alloying. I. Features of Topography and Mechanical Properties of Coatings, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol. Metallophysics and advanced technologies*, 44 (8), 1037–1058. [in Ukrainian].
7. Tarel'nyk N.V. (2024). Pat. Ukrainy na korysnu model 155134. Sposib usunennia zcheplennia elektrodів pry elektroiskrovomu lehuванні stalevykh detalei obladnannia, yake pidliahaie radiatsiinomu oprominiuvanniu [The method of eliminating adhesion of electrodes during electrospark alloying of steel parts of equipment subject to radiation exposure]. zaiav. № u 2023 04455 (22); opubl. 17.01.2024, Biul.№ 3.

М. Д. ШВЕЦЬ

кандидат технічних наук, доцент

Національний університет водного господарства та природокористування

ORCID: 0000-0003-1445-5199

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВЗАЄМОДІЇ ВИДІВ ТРАНСПОРТУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ЛОГІСТИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ

Ця стаття присвячена моделюванню процесів взаємодії різних видів транспорту з метою оптимізації логістичних ланцюгів. У роботі досліджено ключові аспекти та методи інтеграції транспортних систем для забезпечення ефективного і безперервного функціонування логістичних ланцюгів. Забезпечення ефективної взаємодії між різними видами транспорту є критично важливим для оптимізації логістичних ланцюгів. Ця проблема стала особливо актуальною у зв'язку з глобалізацією та зростаючими вимогами до швидкості та надійності доставки товарів. Високий рівень координації між автомобільним, залізничним, водним та авіаційним транспортом є необхідною умовою для досягнення оптимальної логістики. Метою цього дослідження було моделювання процесів взаємодії різних видів транспорту для виявлення та подолання вузьких місць у логістичних ланцюгах. Важливим завданням було розробити ефективну модель, яка б дозволяла забезпечити безперервну та економічно вигідну інтеграцію транспортних систем. У ході дослідження було проаналізовано вплив різних факторів, таких як час доставки, вартість перевезення, доступність інфраструктури та екологічні показники на оптимізацію логістичних ланцюгів. Зокрема, було встановлено, що комбіноване використання залізничного та автомобільного транспорту дозволяє значно скоротити час доставки у порівнянні з використанням лише одного виду транспорту. Крім того, моделювання показало, що оптимізація маршрутів та ефективне використання логістичних хабів може суттєво знизити загальні витрати на транспортування. Отримані результати демонструють, що інтеграція різних видів транспорту є ключовим елементом для оптимізації логістичних ланцюгів. Розроблені моделі можуть бути використані як основа для подальших досліджень та практичних впроваджень у сфері логістики. Застосування запропонованих підходів сприятиме підвищенню ефективності транспортних систем та забезпеченню конкурентоспроможності на глобальному ринку. Результати дослідження можуть бути корисними для широкого кола спеціалістів та організацій, зокрема підприємств, які займаються організацією перевезень та логістичних послуг, державних структур, які відповідають за регулювання транспортної політики та розвиток інфраструктури, вчених та студентів, які працюють над дослідженням логістичних систем та транспортних процесів.

**Ключові слова:** оптимізація логістичних процесів, мультимодальні перевезення, стійкість ланцюгів постачання, моделювання рухомого складу, види транспортних засобів.

M. D. SHVETS

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

National University of Water and Environmental Engineering

ORCID: 0000-0003-1445-5199

## MODELING OF PROCESSES OF INTERACTION OF TRANSPORT MODES FOR OPTIMIZATION OF LOGISTICS CHAINS

This article is devoted to the modeling of interaction processes of various types of transport with the aim of optimizing logistics chains. The work examines the key aspects and methods of integration of transport systems to ensure the efficient and uninterrupted functioning of logistics chains. Ensuring effective interaction between different modes of transport is critical for optimizing logistics chains. This problem has become especially relevant in connection with globalization and growing requirements for speed and reliability of goods delivery. A high level of coordination between road, rail, water and air transport is a necessary condition for achieving optimal logistics. The purpose of this study was to model the processes of interaction of different types of transport to identify and overcome bottlenecks in logistics chains. An important task was to develop an effective model that would allow for seamless and cost-effective integration of transport systems. In the course of the research, several models were created that take into account different scenarios of interaction between modes of transport. The impact of various factors such as delivery time, transportation cost, infrastructure availability and environmental performance were analyzed. In particular, it was established that the combined use of rail and road transport significantly reduces delivery time compared to the use of only one mode of transport. In addition, simulations have shown that route optimization and efficient use of logistics hubs can significantly reduce overall transportation costs. The obtained results demonstrate that the integration of different types of transport is a key element for the optimization of logistics chains. The developed models can be used as a basis for further research and practical implementation in the field of logistics. The application of the proposed approaches will help increase the efficiency of transport systems and

*ensure competitiveness on the global market. The results of the research can be useful for a wide range of specialists and organizations, in particular, enterprises engaged in the organization of transportation and logistics services, government structures responsible for the regulation of transport policy and infrastructure development, scientists and students working on the study of logistics systems and transport processes.*

**Key words:** optimization of logistics processes, multimodal transportation, sustainability of supply chains, rolling stock modeling, types of vehicles.

### Постановка проблеми

В умовах глобалізації та зростаючої конкуренції на ринку транспортних послуг, забезпечення ефективної взаємодії між різними видами транспорту є ключовим завданням для оптимізації логістичних ланцюгів. Наразі транспортні системи стикаються з низкою проблем, які значно впливають на ефективність та надійність логістичних процесів.

Однією з основних проблем є наявність «вузьких місць» у логістичних ланцюгах, які призводять до затримок та підвищення витрат на транспортування. За даними звіту Світового банку, більше 30% часу доставки вантажів у Європі витрачається на очікування в портах та перевантажувальних хабах. Це призводить до зростання операційних витрат та зниження конкурентоспроможності транспортних компаній [1].

Іншою суттєвою проблемою є низький рівень інтеграції між різними видами транспорту. Наприклад, за статистичними даними Європейської комісії, тільки 40% вантажів, які транспортуються залізницею, мають ефективну інтеграцію з автомобільним транспортом. Це обумовлено недостатньою координацією між транспортними компаніями, а також відсутністю сучасної інфраструктури для перевантаження вантажів [2].

Зростання обсягів перевезень також створює екологічні виклики. За даними Міжнародного енергетичного агентства, транспортний сектор є одним з найбільших джерел викидів CO<sub>2</sub>, що становить близько 24% глобальних викидів. Оптимізація логістичних ланцюгів через ефективну інтеграцію різних видів транспорту може суттєво знизити екологічне навантаження на довкілля [3].

Недостатнє впровадження сучасних технологій також є значним бар'єром для оптимізації логістичних ланцюгів. Згідно з дослідженням компанії McKinsey, лише 15% компаній в транспортному секторі використовують передові технології, такі як інтернет речей (IoT), штучний інтелект (AI) та великі дані (Big Data) для управління логістичними процесами. Це обмежує можливості для підвищення ефективності та зниження витрат [4].

Таким чином, для подолання зазначених проблем необхідно розробити комплексну модель взаємодії різних видів транспорту, яка б враховувала всі аспекти логістичного процесу, включаючи час доставки, вартість перевезення, доступність інфраструктури та екологічні показники. Використання сучасних технологій та інтеграція інноваційних рішень у логістичні процеси є критично важливими для досягнення високої ефективності та конкурентоспроможності на глобальному ринку.

Розробка та впровадження такої моделі вимагатиме активної співпраці між транспортними компаніями, урядовими органами та науковими установами, а також значних інвестицій у розвиток інфраструктури та технологій.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Моделювання процесів взаємодії транспортних видів для оптимізації логістичних ланцюгів є ключовим напрямком сучасних досліджень у сфері логістики та транспорту. Аналіз літературних джерел дозволяє визначити основні тенденції та підходи до вирішення цієї проблеми.

Одним з основних аспектів є інтеграція різних видів транспорту для створення ефективних мультимодальних логістичних ланцюгів. У роботі Юркович М. та ін. [18] детально розглянуто концепцію мультимодальних транспортних систем та їх значення для глобальної логістики. Автор наголошує на важливості координації між різними видами транспорту для забезпечення безперервного руху вантажів та зменшення витрат.

Впровадження сучасних технологій є невід'ємною частиною оптимізації логістичних ланцюгів. У роботі Асіма Р. та ін. [16] висвітлено роль технологій, таких як Інтернет речей (IoT), блокчейн, та автоматизація, у покращенні прозорості та ефективності логістичних процесів. Автори зазначають, що використання цих технологій дозволяє оперативно відстежувати вантажі, зменшувати ризики та покращувати управління запасами.

Практичні аспекти впровадження моделей у реальних умовах є важливою темою досліджень. У роботі Абрамович Б. та ін. [15] наведено приклади успішних пілотних проектів та описано методи оцінки ефективності впроваджених рішень. Автори підкреслюють необхідність навчання персоналу та розвитку партнерства між приватним і державним секторами для досягнення успіху в реалізації нових моделей.

Аналіз літературних джерел показує, що моделювання процесів взаємодії транспортних видів є складною, але важливою задачею для оптимізації логістичних ланцюгів. Успішна інтеграція різних видів транспорту, впровадження сучасних технологій та ефективне управління логістичними процесами можуть суттєво підвищити конкурентоспроможність підприємств та забезпечити сталий розвиток логістичних систем. Подальші дослідження та практичне впровадження нових моделей сприятимуть вдосконаленню логістичних ланцюгів та їх адаптації до змін у глобальному середовищі.

### Формулювання мети дослідження

Мета статті – розробка підходів до моделювання процесів взаємодії різних видів транспорту з метою оптимізації логістичних ланцюгів.

Відповідно до поставленої мети визначено наступні завдання дослідження:

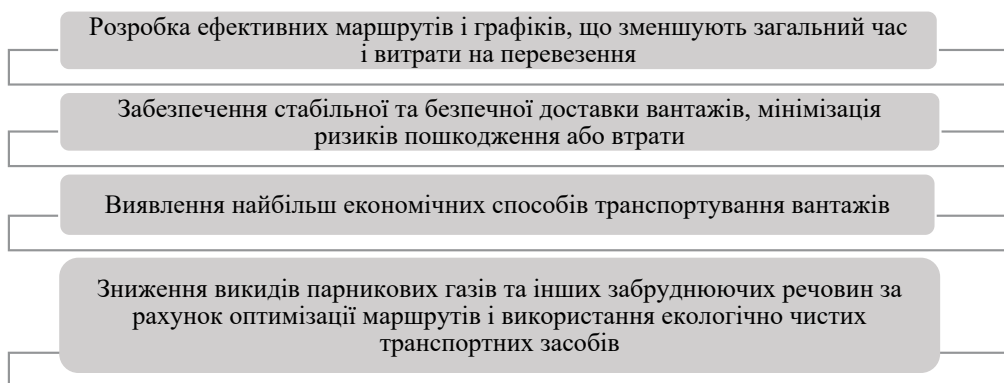
- здійснити ідентифікацію та аналіз вузьких місць в існуючих логістичних ланцюгах, які призводять до затримок і підвищення витрат на транспортування;
- дослідити вплив різних факторів на ефективність логістичних ланцюгів, таких як час доставки, вартість перевезення, екологічні показники та технологічні бар'єри;
- розробити пропозиції для підвищення рівня інтеграції між різними видами транспорту та використання сучасних технологій для оптимізації логістичних процесів.

Ця стаття спрямована на покращення розуміння того, як різні види транспорту можуть взаємодіяти більш ефективно, забезпечуючи стабільний і надійний логістичний ланцюг, що сприяє підвищенню конкурентоспроможності на глобальному ринку.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Моделювання процесів взаємодії видів транспорту – це комплексний процес створення математичних та комп'ютерних моделей для аналізу та оптимізації взаємодії різних видів транспорту у логістичних ланцюгах.

Основна мета моделювання процесів взаємодії транспортних видів полягає в покращенні координації між різними транспортними засобами (автомобільний, залізничний, морський, повітряний транспорт), щоб забезпечити безперебійне та ефективне транспортування вантажів. Його основні завдання наведені на рис. 1.



**Рис. 1. Основні завдання моделювання процесів взаємодії транспортних видів**

*Джерело: складено автором на основі [5-7]*

У процесі дослідження було розглянуто кілька сучасних моделей для оптимізації логістичних ланцюгів шляхом інтеграції різних видів транспорту. Характеристика основних параметрів цих моделей узагальнена нижче.

#### 1. Модель мультимодального транспорту

Мультимодальна модель передбачає використання кількох видів транспорту для доставки вантажів, з урахуванням їх взаємодії на різних етапах логістичного ланцюга. Основні параметри, що враховуються в цій моделі:

- розраховується загальний час, необхідний для перевезення вантажів з початкової точки до кінцевої, з урахуванням часу на перевантаження. Згідно з даними Європейської комісії, середній час простою вантажів у портах Європи становить 30 годин, що можна зменшити на 20% завдяки кращій координації видів транспорту [2];

- включає всі витрати, пов'язані з перевезенням вантажів різними видами транспорту, зокрема витрати на паливо, обслуговування транспорту та плату за використання інфраструктури. Наприклад, дослідження McKinsey показало, що впровадження мультимодальних рішень може знизити витрати на перевезення на 15-20% [4];

- оцінюється наявність та стан інфраструктури для кожного виду транспорту, включаючи порти, залізничні станції та автодороги. За даними звіту Світового банку, більш ніж 40% інфраструктури транспортних коридорів потребує модернізації для підтримки ефективної мультимодальної логістики [1].

- аналізується рівень викидів CO<sub>2</sub> та інших забруднюючих речовин для кожного виду транспорту. За даними Міжнародного енергетичного агентства, транспортний сектор є відповідальним за 24% глобальних викидів CO<sub>2</sub>, з яких мультимодальні перевезення можуть знизити цей показник на 10-15% [3].

#### 2. Модель інтеграції транспортних хабів

Ця модель фокусується на оптимізації взаємодії між транспортними хабами, які є ключовими точками перевантаження та розподілу вантажів. Основні компоненти моделі:

– визначаються оптимальні місця для розміщення транспортних хабів з урахуванням географічного положення, наявності інфраструктури та логістичних маршрутів. За даними дослідження Європейської логістичної асоціації, оптимальне розташування хабів може знизити транспортні витрати на 10-12%;

– оцінюється здатність хабів обробляти різні обсяги вантажів та забезпечувати ефективну взаємодію між різними видами транспорту. За даними дослідження компанії PwC, збільшення перевантажувальних потужностей на 15% може зменшити час перевантаження на 25% [8];

– розробляються оптимальні розклади для мінімізації часу простою транспорту та забезпечення безперервного потоку вантажів. Наприклад, дослідження, проведене компанією Deloitte, показало, що координація розкладів може знизити час простою на 20-30% [9].

### 3. Модель використання сучасних технологій

Ця модель передбачає впровадження сучасних технологій, таких як Інтернет речей (IoT), штучний інтелект (AI) та великі дані (Big Data), для покращення управління логістичними процесами. Головні аспекти моделі:

– використання сенсорів та IoT для відстеження місцезнаходження та стану вантажів у реальному часі. За даними дослідження Gartner, впровадження IoT у логістиці може знизити витрати на 10-15% [10];

– застосування AI для аналізу даних та прогнозування попиту на транспортні послуги, що дозволяє оптимізувати маршрути та розклади. Згідно з дослідженням McKinsey, прогнозування попиту за допомогою AI може підвищити точність планування на 20-25% [4];

– використання Big Data для аналізу логістичних процесів, виявлення вузьких місць та розробки стратегій для їх усунення. Дослідження компанії Accenture показало, що аналіз великих даних може підвищити ефективність логістичних процесів на 15-20% [11].

### 4. Модель оцінки екологічного впливу

Ця модель спрямована на зниження екологічного впливу транспортних процесів шляхом оптимізації маршрутів та використання екологічно чистих видів транспорту. Її основними параметрами є:

– розрахунок викидів CO<sub>2</sub> та інших забруднюючих речовин для кожного виду транспорту та маршруту. За даними Міжнародного енергетичного агентства, впровадження екологічних рішень у транспортній логістиці може знизити викиди CO<sub>2</sub> на 10-20% [3];

– впровадження технологій, що знижують екологічний вплив, таких як електротранспорт та використання відновлюваних джерел енергії. За даними дослідження ICCT, використання електротранспорту може знизити викиди шкідливих речовин на 30-40% [12];

– розробка маршрутів, що мінімізують екологічний вплив та забезпечують ефективне використання ресурсів. Дослідження, проведене компанією KPMG, показало, що оптимізація маршрутів може знизити витрати на паливо на 15-20%.

Результати дослідження показали, що інтеграція різних видів транспорту, використання сучасних технологій та оптимізація логістичних ланцюгів дозволяють значно підвищити ефективність логістичних процесів. Нові моделі демонструють суттєві переваги над традиційними підходами, включаючи зниження витрат, скорочення часу доставки та покращення екологічних показників. Ці висновки підкреслюють важливість впровадження інноваційних рішень для забезпечення конкурентоспроможності логістичних систем у сучасних умовах.

При моделюванні процесів взаємодії транспортних видів для оптимізації логістичних ланцюгів важливо враховувати ряд факторів, які можуть суттєво вплинути на ефективність розроблених моделей. Розглянемо основні з них (табл. 1).

Дані, наведені в таблиці 1, свідчать про те, що ефективність моделей взаємодії видів транспорту для оптимізації логістичних ланцюгів залежить від багатьох факторів, включаючи інфраструктурні, технологічні, економічні, соціально-екологічні та організаційні аспекти. Урахування та оптимізація цих факторів дозволяє досягти високих показників ефективності та забезпечити конкурентоспроможність логістичних систем. Саме тому, наразі важливо забезпечити вирішення таких завдань для підвищення рівня інтеграції між видами транспорту [13-18]:

– створення спільної інформаційної системи для всіх учасників логістичного ланцюга, що дозволить забезпечити швидкий та прозорий обмін даними між різними видами транспорту, зменшити затримки та покращити координацію;

– координація графіків руху різних видів транспорту для мінімізації часів простою та забезпечення безперервного перевантаження вантажів. Це включає інтеграцію залізничних, морських, авіаційних та автомобільних перевезень;

– інвестування в інфраструктуру мультимодальних терміналів, що забезпечують швидку і ефективну пересадку вантажів між різними видами транспорту;

– встановлення єдиних стандартів для контейнерів та інших видів тари, що використовуються для перевезення вантажів. Це дозволить спростити їх перевантаження між різними видами транспорту.

Таблиця 1

**Фактори впливу на моделювання процесів взаємодії транспортних видів  
для оптимізації логістичних ланцюгів**

Назва	Характеристика
<i>Інфраструктурні фактори</i>	
Доступність та якість транспортної інфраструктури	Ефективність моделей значною мірою залежить від наявності та стану доріг, залізничних колій, портів та аеропортів.
Інтеграція транспортних хабів	Взаємодія між різними видами транспорту значно поліпшується, якщо транспортні хаби добре інтегровані.
Географічне розташування	Логістичні рішення залежать від розташування ключових транспортних вузлів та їхнього взаємозв'язку.
Модернізація інфраструктури	Постійне оновлення та вдосконалення транспортної інфраструктури є необхідним для підтримки ефективності логістичних ланцюгів.
<i>Технологічні фактори</i>	
Впровадження сучасних технологій	Використання IoT, AI та Big Data дозволяє покращити управління логістичними процесами.
Автоматизація процесів	Автоматизація транспортних процесів та використання роботизованих систем для перевантаження вантажів може значно підвищити ефективність.
Інтеграція інформаційних систем	Взаємодія між різними видами транспорту поліпшується при інтеграції інформаційних систем, що дозволяє покращити обмін даними між учасниками логістичного ланцюга.
Інноваційні транспортні рішення	Розвиток і використання нових транспортних засобів і технологій, таких як безпілотні автомобілі, можуть значно підвищити ефективність логістичних процесів.
<i>Економічні фактори</i>	
Вартість палива та енергоресурсів	Коливання цін на паливо та енергоресурси можуть впливати на загальні витрати на логістику.
Фінансування інфраструктурних проєктів	Доступ до фінансування для модернізації інфраструктури та впровадження нових технологій є ключовим фактором успішності моделей.
Економічна ситуація в регіоні	Загальна економічна стабільність та рівень розвитку регіону можуть впливати на обсяги перевезень та інвестиції в інфраструктуру.
Структура витрат на логістику	Оптимізація витрат на транспорт і логістику залежить від структури і розподілу витрат між різними елементами логістичного ланцюга.
<i>Соціально-екологічні фактори</i>	
Екологічні вимоги та регулювання	Дотримання екологічних стандартів та впровадження екологічно чистих технологій може впливати на ефективність логістичних моделей.
Рівень підготовки персоналу	Кваліфікація та досвід персоналу, що керує логістичними процесами, є важливим фактором ефективності.
Соціальна відповідальність бізнесу	Враховання соціальних аспектів, таких як умови праці та вплив на місцеві громади, є важливим для підтримки позитивного іміджу та довгострокової стійкості компанії.
<i>Організаційні фактори</i>	
Координація між учасниками логістичного ланцюга	Ефективна координація між виробниками, перевізниками та споживачами сприяє оптимізації логістичних процесів.
Гнучкість логістичних систем	Здатність швидко адаптуватися до змін у попиту та умовах ринку є важливою для ефективності моделей.
Управління ризиками	Оцінка та управління ризиками, пов'язаними з логістичними процесами, є критично важливими для забезпечення надійності постачання.
Взаємодія з регулюючими органами	Взаємодія з державними та міжнародними регулюючими органами впливає на відповідність стандартам і вимогам, що пред'являються до логістичних систем.

*Джерело: складено автором на основі [1-4; 8-12]*

### Висновки

У статті було розглянуто актуальні питання моделювання процесів взаємодії видів транспорту для оптимізації логістичних ланцюгів.

Проведений аналіз дозволив ідентифікувати основні вузькі місця в логістичних ланцюгах, що спричиняють затримки та підвищення витрат на транспортування. Серед них виділено: недостатню координацію між різними видами транспорту, обмежену пропускну здатність інфраструктури (дороги, порти, залізниці), тривалі процедури митного оформлення та адміністративні бар'єри.

Виявлено, що ці вузькі місця призводять до значних затримок у перевезеннях, збільшення витрат на транспортування, а також зниження ефективності логістичних ланцюгів. Особливо гостро це проявляється у міжнародних перевезеннях, де координація між різними видами транспорту та митними органами є критично важливою.

Для підвищення рівня інтеграції та оптимізації логістичних процесів пропонується: впровадити єдину інформаційну платформу, яка дозволить забезпечити координацію між всіма учасниками логістичного ланцюга, інвестувати в модернізацію та розширення транспортної інфраструктури, встановити єдині стандарти для різних видів тари.

Важливим напрямком подальших досліджень є розробка більш точних і адаптивних моделей, які враховують динаміку ринкових змін та розвиток технологій. Це дозволить забезпечити гнучкість і адаптивність логістичних систем до нових викликів та можливостей.

### Список використаної літератури

1. Світовий банк: офіційний сайт. URL: <https://www.worldbank.org/en/homen> (дата звернення: 03.07.2024 р.).
2. Європейська комісія: офіційний сайт. URL: [https://commission.europa.eu/index\\_en](https://commission.europa.eu/index_en) (дата звернення: 03.07.2024 р.).
3. Міжнародне енергетичне агентство: офіційний сайт. URL: [https://jpt.spe.org/tag/international-energy-agency?gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQjw7ZO0BhDYARIsAFttkCjG2kBWtrS1fw5jpD3yYXZADBMSp-QcDV0JV2SzXnv\\_Gpzpp7K5WKsaAtUYEALw\\_wcB](https://jpt.spe.org/tag/international-energy-agency?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw7ZO0BhDYARIsAFttkCjG2kBWtrS1fw5jpD3yYXZADBMSp-QcDV0JV2SzXnv_Gpzpp7K5WKsaAtUYEALw_wcB) (дата звернення: 03.07.2024 р.).
4. McKinsey & Company: офіційний сайт. URL: <https://www.mckinsey.com/> (дата звернення: 03.07.2024 р.).
5. Rodrigue J.-P. The Geography of Transport Systems. Routledge. New York: Routledge, 2024. 402 p.
6. Chopra S., Meindl P. Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation. Pearson. 2021. 12 p.
7. Rushton A., Croucher P., Baker P. The Handbook of Logistics and Distribution Management. Kogan Page. 2022. 721 p.
8. PwC: офіційний сайт. URL: <https://www.pwc.com/gx/en.html> (дата звернення: 03.07.2024 р.).
9. Deloitte: офіційний сайт. URL: <https://www2.deloitte.com/us/en.html> (дата звернення: 03.07.2024 р.).
10. Gartner: офіційний сайт. URL: <https://www.gartner.com/en> (дата звернення: 03.07.2024 р.).
11. Accenture: офіційний сайт. URL: <https://www.accenture.com/us-en> (дата звернення: 03.07.2024 р.).
12. ICCT: офіційний сайт. URL: <https://theicct.org/> (дата звернення: 03.07.2024 р.).
13. Klapita V. Simulation as tool for logistic chain optimization. *Transport Technic and Technology*. 2022. Vol. 18. No. 2. P. 15-20.
14. Motaghedi-Larijani A., Aminnayeri, M. Optimizing the number of outbound doors in the crossdock based on a new queuing system with the assumption of beta arrival time. *Scientia Iranica*. 2018. Vol. 25. No. 4. P. 2282-2296. doi: <https://doi.org/10.24200/sci.2017.4452>.
15. Abramović B., Šipuš D., Jurešić D. A preparatory survey in integrated passenger transport planning: A case study. *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 53. P. 16-22. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.002>
16. Ashima R., Haleem A., Bahl S., Nandan D., Javaid M. Automation of AM via IoT towards implementation of e-logistics in supply chain for industry 4.0. *Recent Advances in Mechanical Engineering*. Springer, 2022. doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-9057-0\\_20](https://doi.org/10.1007/978-981-16-9057-0_20).
17. Illes, L., Jurkovic, M., Kalina, T., Sosedova, J., Gorzelanczyk, P., Stopka, O., Kubjatko, T. Concept and performance analysis of propulsion units intended for distributed ship systems. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10. No. 4. doi: <https://doi.org/10.3390/jmse10040448>.
18. Jurkovic M., Kalina T., Morvay K., Hudcovsky M., Luptak V., Gorzelanczyk P. Assessment of the logistics solutions in the automotive using operational research. *Reliability and Statistics in Transportation and Communication*. Springer, 2021. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-68476-1\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68476-1_34).

### References

1. *Svitovyi bank* [World Bank]. Retrieved from: <https://www.worldbank.org/en/homen> [in Ukrainian].
2. *Yevropeiska komisiia* [European Commission]. Retrieved from: [https://commission.europa.eu/index\\_en](https://commission.europa.eu/index_en) [in Ukrainian].
3. *Mizhnarodne enerhetychne ahentstvo* [International Energy Agency]. Retrieved from: [https://jpt.spe.org/tag/international-energy-agency?gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQjw7ZO0BhDYARIsAFttkCjG2kBWtrS1fw5jpD3yYXZADBMSp-QcDV0JV2SzXnv\\_Gpzpp7K5WKsaAtUYEALw\\_wcB](https://jpt.spe.org/tag/international-energy-agency?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw7ZO0BhDYARIsAFttkCjG2kBWtrS1fw5jpD3yYXZADBMSp-QcDV0JV2SzXnv_Gpzpp7K5WKsaAtUYEALw_wcB) [in Ukrainian].
4. McKinsey & Company. Retrieved from: <https://www.mckinsey.com/> [in Ukrainian].
5. Rodrigue, J.-P. (2024). The Geography of Transport Systems. Routledge. New York: Routledge, 402 p.
6. Chopra, S., Meindl, P. (2021). Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation. Pearson, 12 p.
7. Rushton, A., Croucher, P., Baker, P. (2022). The Handbook of Logistics and Distribution Management. Kogan Page, 721 p.
8. PwC. Retrieved from: <https://www.pwc.com/gx/en.html> [in Ukrainian].
9. Gartner. Retrieved from: <https://www2.deloitte.com/us/en.html> [in Ukrainian].
10. Accenture. Retrieved from: <https://www.gartner.com/en> [in Ukrainian].
11. Accenture. Retrieved from: <https://www.accenture.com/us-en> [in Ukrainian].
12. ICCT. Retrieved from: <https://theicct.org/> [in Ukrainian].
13. Klapita, V. (2022). Simulation as tool for logistic chain optimization. *Transport Technic and Technology*, 18(2), 15-20.



14. Motaghedi-Larijani, A., Aminnayeri, M. (2018). Optimizing the number of outbound doors in the crossdock based on a new queuing system with the assumption of beta arrival time. *Scientia Iranica*, 25(4), 2282-2296. doi: <https://doi.org/10.24200/sci.2017.4452>.
15. Abramović, B., Šipuš, D., Jurešić, D. (2021). A preparatory survey in integrated passenger transport planning: A case study. *Transportation Research Procedia*, 53, 16-22. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.002>
16. Ashima, R., Haleem, A., Bahl, S., Nandan, D., Javaid, M. (2022). Automation of AM via IoT towards implementation of e-logistics in supply chain for industry 4.0. *Recent Advances in Mechanical Engineering*. Springer. doi: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-9057-0\\_20](https://doi.org/10.1007/978-981-16-9057-0_20).
17. Illes, L., Jurkovic, M., Kalina, T., Sosedova, J., Gorzelanczyk, P., Stopka, O., & Kubjatko, T. (2022). Concept and performance analysis of propulsion units intended for distributed ship systems. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(4). doi: <https://doi.org/10.3390/jmse10040448>.
18. Jurkovic, M., Kalina, T., Morvay, K., Hudcovsky, M., Luptak, V., Gorzelanczyk, P. (2021). Assessment of the logistics solutions in the automotive using operational research. *Reliability and Statistics in Transportation and Communication*. Springer. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-68476-1\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68476-1_34).

О. Ю. ЮРЧЕНКО

старший викладач  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-3047-6654

Т. П. ВОЛОШКО

старший викладач  
Сумський національний аграрний університет  
ORCID: 0000-0003-2605-8836

## МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ТА ВРЕГУЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ СИТУАЦІЙ НА ТРАНСПОРТІ ЗА ПОРУШЕНЬ ДОПУСТИМОЇ ВАНТАЖОПІДЙОМНОСТІ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ ЗЕРНА

Виконання важливих операцій на транспорті, таких як перевезення вантажів – зернової маси, вимагають підвищеної уваги. З цим пов'язана велика кількість зловживань водіями транспортних засобів, що потім негативно відзначається на різних аспектах. До таких порушень відносять, головним чином, перевищення допустимої повної маси транспортного засобу. Така маса, вочевидь, визначається як сумарна маса транспортного засобу або автопоїзда та маса вантажу, який перевозиться. Широкого розголосу набувають ситуації з перевірки пунктами передвижного вагового контролю маси вантажних транспортних засобів, що задіяні, у тому числі, і на перевезенні зерна. Популяризація таких ситуацій обумовлена накладанням штрафів перевізникам вантажів. В результаті, такі ситуації ускладнюються можливим вивантаженням зерна на проїжджій частині або на обочині. Ускладнення таких ситуацій веде за собою не лише порушення правил та норм щодо перевезення вантажу, а і забруднення окремих територій проїжджогої частини, що також несе за собою відповідальність. В даній роботі розглянуто рух вантажних транспортних засобів частиною Сумської області по досить розгалуженій ділянці руху, що є зв'язуючою з різними сільськогосподарськими підприємствами, елеваторами, тощо. Крім того, специфіка обраного району для дослідження полягає в єдиному можливому русі по такому маршруті, що визначається рухом по мосту. Внаслідок цього, обґрунтовано вибір маршруту та транспортні засоби для проведення аналізу. Згідно з правилами дорожнього руху, вимогами та нормами проаналізовано порушення транспортними засобами власних габаритних розмірів та допустимої маси. Представлено наслідки такої експлуатації як для транспортного засобу, так і для дорожнього покриття. Здійснено аналіз розважування по осям автопоїзда при перевищенні допустимої маси. Представлено конкретні приклади функціонування пунктів вагового контролю, якими здійснюється контроль маси вантажу, який перевозиться транспортним засобом по заданим маршрутам.

**Ключові слова:** транспортний засіб, правила дорожнього руху, автопоїзд, причеп, зерно, пункти вагового контролю, порушення, маса, перевезення, вантаж, маршрут.

O. YU. YURCHENKO

Senior Lecturer  
Sumy National Agrarian University  
ORCID: 0000-0002-3047-6654

T. P. VOLOSHKO

Senior Lecturer  
Sumy National Agrarian University  
ORCID: 0000-0003-2605-8836

## METHODS OF CONTROL AND ADJUSTMENT OF COMPLEX TRANSPORT SITUATIONS DUE TO VIOLATION OF THE ALLOWABLE LOAD CAPACITY OF THE VEHICLE WHEN TRANSPORTING GRAIN

Carrying out important transport operations, such as the transportation of cargo – grain mass, requires increased attention. This is associated with a large number of abuses by vehicle drivers, which then negatively affects various aspects. Such violations include, mainly, exceeding the permissible total weight of the vehicle. Such mass is obviously defined as the total mass of the vehicle or road train and the mass of the cargo being transported. Situations of checking the mass of freight vehicles involved, including grain transportation, by mobile weighing control points are becoming widely publicized. The popularization of such situations is due to the imposition of fines on cargo carriers. As a result,

*such situations are complicated by the possible unloading of grain on the roadway or on the side of the road. The complication of such situations entails not only the violation of rules and norms regarding the transportation of cargo, but also the pollution of certain areas of the roadway, which also entails responsibility. This paper examines the movement of freight vehicles in a part of the Sumy region along a rather extensive section of the road, which is connected to various agricultural enterprises, elevators, etc. In addition, the specifics of the selected area for research consists in the only possible movement on such a route, which is determined by movement on the bridge. As a result, the choice of route and means of transport for the analysis is justified. In accordance with traffic rules, requirements and norms, violations by vehicles of their own overall dimensions and permissible weight were analyzed. The consequences of such operation for both the vehicle and the road surface are presented. An analysis of the weighting along the axles of the road train when the permissible weight is exceeded was carried out. Specific examples of the operation of weight control points are presented, which control the mass of cargo transported by vehicles on specified routes.*

**Key words:** vehicle, traffic rules, road train, trailer, grain, weight control points, violation, weight, transportation, cargo, route.

### Постановка проблеми

Ситуація з вантажоперевезеннями, що спостерігається на сьогоднішній день, вимагає як постійного втручання в законодавчу базу, так і паралельного врегулювання відносин правоохоронних органів та безпосередньо перевізника діючою базою.

У статті 22 п. 1 Правил дорожнього руху України сказано: «Маса вантажу, що перевозиться, і розподіл навантаження на осі не повинні перевищувати величин, визначених технічною характеристикою даного транспортного засобу» [1]. Однак, системою, в якій доводиться діяти перевізнику, не рідко фіксуються перевищення норм вантажопідйомності транспортного засобу, що спричиняє різні негативні наслідки. До найбільш ймовірних наслідків такого порушення експлуатації транспортного засобу та дорожнього покриття можемо віднести:

- руйнування дорожнього полотна та мостів;
- провокація аварійних ситуацій;
- завдання шкоди вантажу або перекидання авто;
- збільшення гальмівного шляху;
- погіршення стану транспортного засобу.

Перевезення зерна, що є одним з найбільш масових видів перевезень, протягом тривалого проміжку часу – півроку, а не рідко і повного календарного року, залишає за собою негативний відбиток на в експлуатаційному циклі як певного проміжку траси, так і транспортного засобу. Більшість із вантажних транспортних засобів, серед яких перевага віддається тим, що транспортують зерно на відносно короткі відстані – до 50 кілометрів, працюють із постійними перевантаженнями. Тому, актуальним є дослідження такого виду порушення правил експлуатації транспортного засобу та дорожнього покриття і механізмів врегулювання таких ситуацій як з боку правоохоронних органів, так і із боку компанії-перевізника.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Так як дорожні конфлікти є основною причиною серйозних і смертельних травм, 90% з них пояснюються поведінковими причинами, тому важливим є підхід до їх аналізу. У дослідженні [2] розглядається отримання інформації через дорожні знаки та їх зв'язок зі стилем водіння та підходами для розуміння чи існує безпечний мінімальний рівень інформації для водіїв і до чого цей рівень відноситься.

Отримані в дослідженні [3] дані показують, що тривога, стрес та депресія є передіндикаторами несприятливих наслідків водіння (наприклад, схильність до ризику, агресія, погана поведінка за кермом). Негативні риси особистості пов'язані з негативною поведінкою за кермом, у той час, як вищий рівень добробуту та задоволеності життям, мабуть, захищає водіїв від навмисних порушень правил керування [3].

За останні роки кількість систем, вбудованих в автомобілі, зростає завдяки розвитку нових технологій і привабливості цих технологій для споживача [4]. При цьому, перевантаження транспорту на автомагістралях є загрозою та проблемою для структур, на яких лежить відповідальність за утримання дорожньої інфраструктури – це не лише збільшує їх витрати, а і є однією з основних причин дорожньо-транспортних пригод. Понад 50% комерційних автомобілів, що курсують нашими національними/державними автомагістралями, перевантажені. Хоча існують законні обмеження по навантаженню на вісь та межі повної маси транспортних засобів, що курсують дорогами, вони зловмисно порушуються перевізниками. Пошкодження дорожнього покриття перевантаженими транспортними засобами є експонентним. Вважається, що збитки, завдані дорожньому покриттю навантаженням на вісь, що вдвічі перевищує навантаження на стандартну вісь, у 16 разів перевищує збитки, завдані останньою [5].

Існують стандартні законні межі навантаження на вісь і межі повної маси транспортного засобу, але вони не дотримуються перевізниками і правоохоронними органами. Перевантажені транспортні засоби скорочують розрахунковий термін дорожнього покриття. Контроль над перевантаженням запобігає передчасному руйнуванню дорожнього покриття. У роботі [5] представлені переваги з точки зору доходів від плати за проїзд для контролю за навантаженням у проєкті «Будівництво, експлуатація та передача» на реальному прикладі. З тематичного

дослідження видно, що максимального доходу було досягнуто за рахунок того, що транспортному засобу дозволено курсувати дорогою з максимально дозволеним законним навантаженням. Крім позитивних аспектів, зазначених вище, контроль перевантаження знижує кількість нещасних випадків, збільшує швидкість транспортних засобів, потребує менших витрат на технічне обслуговування дорожнього покриття та експлуатаційних витрат.

У роботі [6] представлений аналіз для розрахунку витрат на пошкодження дорожнього покриття внаслідок перевантаження, і, отже, можливість визначення суми витрат, які мають понести користувачі автомобілів від перевантаження. Перевантаження важкого транспортного засобу спричиняє структурне пошкодження дорожнього покриття та скорочує термін служби протягом проектного терміну служби. Наявність перевантаження вказує на ширину площі колії, яка становить понад 60% від загального пошкодження конструкції дороги на кілометр, і реальне максимальне навантаження на вісь важкого транспортного засобу, яке перевищує його стандартне значення. Вартість втрат від руйнування дорожнього покриття внаслідок перевантаження розраховано на основі коефіцієнта пошкодження і дефіцитного розрахункового терміну служби. Витрати на збитки, які повинен понести користувач перевантаженого автомобіля, становлять 60% від загальної вартості DFC (коефіцієнт пошкодження) і DDLС (вартість проектного терміну експлуатації), враховуючи, що не всі структурні пошкодження тротуарів спричинені перевантаженням вантажного транспорту [6].

Автомобілі забирають значну кількість енергії, а для повної підвіски транспортного засобу конфлікт між потенційно зібраною енергією та динамікою транспортного засобу, представленими якістю їзди, безпекою та керованістю, був всебічно проілюстрований для різних вхідних режимів [7]. Аналізом представлено, що перевантажені транспортні засоби підходять для системи збирання енергії на основі одержуваної енергії на одиницю вартості.

Огляд літератури з автономних транспортних засобів показав, що вони пропонують кілька переваг, таких як зменшення заторів на дорогах та викидів, а також покращення транспортної доступності. Найвищого рівня автоматизації буде досягнуто, коли люди залишаться важливою складовою циклу водіння, що вимагає повного розуміння їхньої ролі в автоматизованому водінні [8]. Тому, в залежності від стилю водіння та, в даному випадку, маси перевезеного вантажу, водій може впливати на більшу кількість факторів, ніж просто на користування автомобілем [9], що показано в роботі [10], де проведено детальне дослідження для аналізу 5 типових ушкоджень, що виникають в автомобільних шинах з аналізом можливості такої технології, а також виникнення небажаних явищ.

#### Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є опис негативного впливу вантажних перевезень, що виконуються з перевищенням допустимої маси вантажу транспортними засобами, та ділянки контролю за ними.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Кожен вантажний транспортний засіб характеризується певними технічними характеристиками. Дані характеристики є прописаними заводом-виробником або спеціально уповноваженою структурою у разі переобладнання транспортного засобу. З приводу останнього скажімо – переобладнання бортового вантажного транспортного засобу в самоскид. В такому випадку, найімовірніше, вантажопідйомність транспортного засобу буде зменшено. Це відбувається за рахунок збільшення маси конструкції і, як наслідок, власної маси автомобіля, проте залишається стандартною повна маса автомобіля, прописана заводом-виробником. Наприклад, переобладнання бортового КАМАЗ-5320 (рис. 1) вантажопідйомністю 8000 кг в самоскид, що несе за собою установку підрамника, підйомного циліндра, а не рідко і проектування та виготовлення нового самоскидного кузова фірмою, що спеціалізується на даного виду виробництві, призведе до зменшення вантажопідйомності. Якщо власна маса бортового авто складала 7080 кг при вантажопідйомності 8000 кг, то переобладнаний транспортний засіб, скажімо, з власною масою 7580 кг за незмінної повної маси 15305 кг (з урахуванням палива і т.п.) призведе до зменшення вантажопідйомності до 7500 кг.



Рис. 1. Переобладнані вантажні транспортні засоби. А – МАЗ-533605-221; Б – КАМАЗ-5320



Рис. 2. Умови роботи зерновоза

Як показано на рисунку 1, переобладнані автомобілі МАЗ 533605-221 та КАМАЗ-5320 вантажопідйомністю відповідно 11200 кг та 8000 кг використовуються для транспортування зерна кукурудзи. В випадку, зображеному на рис. 1, кожен із них був завантажений 19500 та 18700 кг відповідно. Тобто, можна спостерігати перевищення вантажопідйомності транспортних засобів більше, ніж у 2 рази. Слід враховувати і перевантаження причепа, що працює з автомобілем МАЗ – ГКБ-8527, де маса вантажу, що перевозиться, більше, ніж у два рази перевищує допустиму норму.

Приведений вище приклад зменшення вантажопідйомності не рідко може бути приводом перевантаження, а особливо у тих випадках, коли об’єм кузова збільшено. Здавалося б, що на тягові характеристики транспортного засобу перевантаження на 20% практично не несе впливу, але і збільшення маси вантажу за норму, прописану заводом на 50–70% на сьогоднішній день не є рідкістю.

Для конкретного прикладу огляд досліджуваного району транспортування зерна є можливість розглянути місто Ромни Сумської області. Даний район є одним із великих районних центрів по області, де знаходяться одразу кілька елеваторів, серед яких: Елеватор Роменський КХП ДАК Хліб України, Елеватор «Рубін», Білівідський КХП і т.п.



Рис. 3. Концентрація одразу трьох елеваторів Роменського району. А – елеватор ТОВ Агрохімпродукт; Б – Білівідський елеватор СТОВ «Дружба-Нова»; В – Білівідський КХП

Слід враховувати, що обраний для дослідження район транспортних перевезень характеризується з огляду на прокладку доріг по доступу до, наприклад, Роменського елеватору КХП ДАК Хліб України одним можливим варіантом під'їзду – через Засульський міст та по вулиці Маяковського (рис. 4).



Рис. 4. Засульський міст

Особливістю обраного району, як було сказано вище, є єдино можливий варіант під'їзду – через Засульський міст. Слід враховувати і обмеження, що указані на знаках з обох боків мосту – 12000 кг розподілу навантаження на вісь. Тобто, показані на рисунку 1 варіанти перевантаження автомобілів не є можливими не лише з точки зору погіршення технічного стану автомобіля через перевищення норми його вантажопідйомності, а і з точки зору вимог по розподілу маси по осям при русі через показаний міст досліджуваного району транспортних робіт.

Як сказано у статті 22 п. 3 Правил дорожнього руху України: «Перевезення вантажу дозволяється за умови, що він:

- б) не порушує стійкості транспортного засобу і не утруднює керування ним;
- в) не обмежує водієві оглядовості».

Представлені окремі дві складові дозволу на перевезення вантажу, показані у Правилах дорожнього руху, спрямовані, головним чином, на уникнення руху транспортного засобу з перевищенням норм по його вантажопідйомності, а також, перш за все, його габаритним розмірам. Останнє найбільш часто спостерігається саме на зерновозах і, як приклад, може бути розглянутим на рис. 1 та 2.

Результатом аналізу діючих обмежень по використанню руху автомобілів, зображених на рис. 1 та 2, є порушення норм, адже повна маса автопоїзду, зображеного на рис. 1А, складає 53 тони. Відповідно, навіть не взявши до уваги правильність розподілу маси по осям, прописаним заводом-виробником, в середньому, навантаження на кожен з осей уже складає 13,25 тон.

Крім того, пунктом 5 (б) статті 22 Правил дорожнього руху України встановлено обмеження на рух транспортних засобів та їх складів у разі, коли їх параметри перевищують фактичну масу для автопоїзду, двовісного або тривісного автомобіля з двовісним або тривісним причепом – 40 та 24 тони відповідно по максимальному значенню для автомобільних доріг державного та місцевого значення.

Аналізуючи автомобіль КАМАЗ, зображений на рисунку 1Б з точки зору правил, прописаних у пункті 5 (б) статті 22 Правил дорожнього руху України, можна зробити висновок, що його експлуатація також не може бути допустимою, адже норми, показані в пункті 5 (б), накладають обмеження на рух вантажного тривісного автомобіля тоді, коли його фактична маса перевищує максимальне значення для автомобільних доріг державного і місцевого значення відповідно 25 (26) та 21 тон. Вантаж 26 тон, позначений у діючих Правилах з приміткою означає, що він може бути допустимим для тривісних автомобілів, якщо ведучу вісь буде обладнано здвоєними колесами і максимальне навантаження на кожен вісь не перевищуватиме 9,5 тон. Аналогічну заборону на такого роду експлуатацію автомобіля слід вважати із точки зору його вантажопідйомності, що указана заводом-виробником – 8000 кг для бортового КАМАЗ-5320 та 7500 кг для самоскида КАМАЗ-55102.



Рис. 5. Розподіл маси по осям. Зел. – допустима маса, черв. – фактична маса

Наслідками такого роду порушень експлуатації транспортних засобів та доріг як державного, так і місцевого призначення може бути як погіршення технічного стану транспортного засобу (рисунок 6), так і дорожнього покриття (рис. 8). До погіршення технічного стану можна віднести, головним чином, просідання або тріскання ресор, погіршення роботи підвіски, вихід зі строю коліс тощо.



Рис. 6. Вплив перевантаження та стан окремих частин автомобіля

На рисунку 6 зображено окремі елементи автомобіля МАЗ-533605-221, зображеного на рис. 1А, при експлуатації у складі автопоїзду з причепом повною масою 53 тони. З точки зору технічного стану, особливої уваги набуває погіршення технічного стану ресор, підресорників, коліс, переднього та заднього мостів, торсіонів тощо.

Аналогічним чином, вплив перевантаження в 2–2,5 рази за допустиму норму можна спостерігати на прикладі причепів, що зображено на рис. 7.



Рис. 7. Вплив перевантаження та стан окремих частин автомобіля



Рис. 8. Вплив на дорожнє покриття після тривалого простою перевантаженого транспортного засобу

Контроль за якістю вантажних перевезень, як і будь-якого виду перевезень покладається на відповідні державні органи. Якщо розглядати саме вантажні перевезення, то одним із таких методів є використання пунктів габаритно-вагового контролю. Сучасний підхід до виконання операцій по контролю за масою



автомобіля спрямований на уникнення порушень норм експлуатації вантажних транспортних засобів та автомобільних доріг.

Розвиток технологій не стоїть на місці, а тому в використанні відповідних державних органів є і системи автоматичного габаритно-вагового контролю. Слід зазначити, що зважування на ходу – є сучасною розумною системою комплексного збору інформації про транспортні засоби, що рухаються автомобільними дорогами. В такий спосіб здійснюється автоматичний моніторинг руху автомобілів на дорогах в режимі реального часу. Крім того, гарантується точність вимірювання з мінімальною похибкою, а також збір необхідних даних щодо транспортних засобів. Під останнім мається на увазі фото-відео фіксація як самого транспортного засобу, так і його номерного знаку.



**Рис. 9. Пункт габаритно-вагового контролю. А – м. Суми; Б – с. Овлаші, Роменський район; В – с. Юсківці, Миргородський район**

За рахунок фіксації порушення норм перевезення вантажу транспортними засобами згодом приймаються відповідні міри. Найбільш поширеними з них є нанесення штрафів компанії-перевізнику чи водію безпосередньо. Згідно з діючим законодавством, кожен водій вантажного транспортного засобу зобов'язаний зупинитись на вимогу інспектора та надати йому необхідну для перевірки документацію. У разі, якщо власник транспортного засобу відмовляється від проходження габаритно-вагового контролю чи всіяко протидіє виконанню обов'язків працівників державної служби з безпеки на транспорті, до нього можуть бути прийнятими відповідні міри, частіше за все, – штрафи. Крім того, передбачено санкції в разі виявлення неправильних даних в документації, що стосується вантажу.

З іншого боку, врегулювання відносин «перевізник-правоохоронна система» не завжди можуть бути чітко обґрунтованими для перевізника. Накладені обмеження мають стосуватися кожного в незалежності від того чи це фермер, на балансі якого є 30 га землі, чи це велика агрофірма типу «Дружба-Нова». Закон має бути одним, а відповідно плата податків та перевезення вантажу мають бути чітко врегульованими країною.

Таким чином, регулювання маси вантажу, в даному випадку, зерна, що перевозиться вантажним транспортним засобом, є можливим за рахунок проведення контролю та моніторингу маси і стану автомобіля, що згодом може нести за собою відповідальність водія чи фірми-перевізника та матеріальні відшкодування.

#### **Висновки**

Сучасний підхід в будь-якого роду виробництві базується на правильному використанні ресурсів та можливостей. Відповідним чином, за раціонального використання автомобільного транспорту на дорогах як державного, так і місцевого значення є можливість виконання технологічної операції транспортування вантажу без завдання шкоди автомобілеві та дорожньому покриттю. За рахунок встановлення стаціонарних та мобільності передвижних пунктів габаритно-вагового контролю є можливість зниження такого впливу та покращення умов для подальшого використання техніки та доріг загального користування.

## Список використаної літератури

1. Правила дорожнього руху (ПДР України) 2023.
2. Bortei-Doku, S., Kaplan, S., Prato, C.G., & Nielsen, O.A. Road signage comprehension and overload: The role of driving style and need for closure. *Transportation research procedia*, 24, 442-449. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.065>
3. Bowen, L.D., Budden, S., & Smith, A.P. (2020). Factors underpinning unsafe driving: A systematic literature review of car drivers. *Transportation Research Part F-traffic Psychology and Behaviour*, 72, 184-210. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2020.04.008>
4. Girard, J., Younsi, K., Tricot, N.J., & Popieul, J. (2007). Towards a real time workload of the driver: The analysis of driving performance evolution under overloaded conditions. *IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems*. <https://doi.org/10.3182/20070904-3-KR-2922.00050>
5. Bagui, S.K., Das, A., & Bapanapalli, C. (2013). Controlling Vehicle Overloading in BOT Projects. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 104, 962-971. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.191>
6. Mulyono, A.T., Parikesit, D., Antameng, M., & Rahim, R. (2010). Analysis of Loss Cost of Road Pavement Distress due to Overloading Freight Transportation. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 8, 139-139.
7. Abdelkareem, M.A., Xu, L., Guo, X., Ali, M.K., Elagouz, A., Hassan, M.A., Essa, F.R., & Zou, J. (2018). Energy harvesting sensitivity analysis and assessment of the potential power and full car dynamics for different road modes. *Mechanical Systems and Signal Processing*. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.03.009>
8. Calvi, A., D'Amico, F., Ferrante, C., & Ciampoli, L.B. (2020). A driving simulator study to assess driver performance during a car-following maneuver after switching from automated control to manual control. *Transportation Research Part F-traffic Psychology and Behaviour*, 70, 58-67. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2020.02.014>
9. Loman, M., Šarkan, B., & Skrúcaný, T. (2021). Comparison of fuel consumption of a passenger car depending on the driving style of the driver. *Transportation Research Procedia*. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.009>
10. Fedorko, G., Molnár, V., Dovica, M., Tóth, T., Soos, L., Fabianová, J., & Piňosová, M. (2019). Failure analysis of irreversible changes in the construction of car tyres. *Engineering Failure Analysis*. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.05.035>

## References

1. Road Rules (DDR of Ukraine) 2023.
2. Bortei-Doku, S., Kaplan, S., Prato, C.G., & Nielsen, O.A. (2017). Road signage comprehension and overload: The role of driving style and need for closure. *Transportation research procedia*, 24, 442-449. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.065>
3. Bowen, L.D., Budden, S., & Smith, A.P. (2020). Factors underpinning unsafe driving: A systematic literature review of car drivers. *Transportation Research Part F-traffic Psychology and Behaviour*, 72, 184-210. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2020.04.008>
4. Girard, J., Younsi, K., Tricot, N.J., & Popieul, J. (2007). Towards a real time workload of the driver: The analysis of driving performance evolution under overloaded conditions. *IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems*. <https://doi.org/10.3182/20070904-3-KR-2922.00050>
5. Bagui, S.K., Das, A., & Bapanapalli, C. (2013). Controlling Vehicle Overloading in BOT Projects. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 104, 962-971. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.191>
6. Mulyono, A.T., Parikesit, D., Antameng, M., & Rahim, R. (2010). Analysis of Loss Cost of Road Pavement Distress due to Overloading Freight Transportation. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 8, 139-139.
7. Abdelkareem, M.A., Xu, L., Guo, X., Ali, M.K., Elagouz, A., Hassan, M.A., Essa, F.R., & Zou, J. (2018). Energy harvesting sensitivity analysis and assessment of the potential power and full car dynamics for different road modes. *Mechanical Systems and Signal Processing*. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.03.009>
8. Calvi, A., D'Amico, F., Ferrante, C., & Ciampoli, L.B. (2020). A driving simulator study to assess driver performance during a car-following maneuver after switching from automated control to manual control. *Transportation Research Part F-traffic Psychology and Behaviour*, 70, 58-67. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2020.02.014>
9. Loman, M., Šarkan, B., & Skrúcaný, T. (2021). Comparison of fuel consumption of a passenger car depending on the driving style of the driver. *Transportation Research Procedia*. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.009>
10. Fedorko, G., Molnár, V., Dovica, M., Tóth, T., Soos, L., Fabianová, J., & Piňosová, M. (2019). Failure analysis of irreversible changes in the construction of car tyres. *Engineering Failure Analysis*. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.05.035>

## ТЕХНОЛОГІЯ ЛЕГКОЇ ТА ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 677.075:620.17:[687.254: 615.477.2

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.21>

Л. Є. ГАЛАВСЬКА

доктор технічних наук, професор  
Київський національний університет технологій та дизайну  
ORCID: 0000-0002-6994-6641

І. О. ДУДНИК

магістрантка кафедри технології моди  
Київський національний університет технологій та дизайну  
ORCID: 0009-0008-0927-395X

А. Т. АРАБУЛІ

кандидат технічних наук, доцент  
Київський національний університет технологій та дизайну  
ORCID: 0000-0002-2583-4998

Д. І. КОЛЬЧИК

аспірант кафедри технології моди  
Київський національний університет технологій та дизайну  
ORCID: 0009-0008-0927-395X

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА РЕЛАКСАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРИКОТАЖНОГО МАТЕРІАЛУ ЧОХЛА ДЛЯ КУЛЬТІ**

*Війна в Україні змінила вектор наукових досліджень у сфері трикотажного виробництва, що обумовлено потребою у вітчизняних зразках трикотажних матеріалів та виробів медичного призначення. Зокрема внаслідок великої кількості за останні три роки людей з мінно-вибуховими ураженнями кінцівок, які призвели до їх ампутації, не лише серед військовослужбовців, а й цивільного населення, виникла потреба у розробці вітчизняних функціональних трикотажних матеріалів, призначених для виготовлення чохла для культі. Медичний текстиль для догляду за ампутованою кінцівкою у післяопераційний період, на етапі реабілітації та підготовки до протезування відіграє важливу роль у ефективній корекції формування культі. Реабілітація перед протезуванням включає компресійну терапію, масаж рубців, гігієну кукси та фантомне знеболення. Компресійна терапія забезпечується завдяки використанню трикотажних матеріалів та виробів заданої форми з компресійними властивостями.*

*У ході досліджень розроблено структуру трикотажного матеріалу трубчастої форми із розташуванням еластомерної нитки в структурі ґрунту у вигляді пресових накидів та протяжок з рапортом прокладання 1+1 та 1+3. Дослідні зразки вироблено на круглопанчіному автоматі 13 класу з діаметром циліндра 3,75 дюйма. У процесі в'язання змінювали натяг еластомерної нитки шляхом зміни швидкості подачі еластомерної нитки у структуру ґрунту. При цьому змінювали щільність в'язання по вертикалі на трьох рівнях.*

*Виявлено характер впливу щільності в'язання ґрунту за умови незмінної швидкості подачі еластомерної нитки на деформаційні характеристики трикотажного матеріалу. При цьому встановлено, що за умови незмінної щільності в'язання швидкість подачі еластомерної нитки не має суттєвого впливу на деформаційні характеристики трикотажу. Завдяки введенню у структуру трикотажного матеріалу еластомерної нитки рівень залишкової деформації складає не більше 4%, що говорить про достатній рівень формостабільності під впливом експлуатаційних навантажень.*

**Ключові слова:** медичний текстиль, трикотажний матеріал, деформація текстильного матеріалу, релаксація деформації текстильного матеріалу, 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

I. O. DUDNYK

Master's Student at the Department of Fashion Technology  
Kyiv National University of Technologies and Design  
ORCID: 0009-0008-0927-395X

A. T. ARABULI

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Kyiv National University of Technologies and Design  
ORCID: 0000-0002-2583-4998

D. I. KOLCHYK

Postgraduate Student at the Department of Fashion Technology  
Kyiv National University of Technologies and Design  
ORCID: 0009-0008-0927-395X

## STUDY OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE RELAXATION CHARACTERISTICS OF A KNITTED MATERIAL COVER FOR STUMPS

*The war in Ukraine has changed the vector of scientific research in the field of knitwear production due to the need for domestic samples of knitted materials and medical devices. In particular, due to the large number of people with mine-blast injuries to their limbs that led to amputation over the past three years, not only among military personnel but also among the civilian population, there is a need to develop domestic functional knitwear materials for the manufacture of stump covers. During rehabilitation and prosthetic preparation, medical textiles for the care of an amputated limb in the postoperative period play an important role in effectively correcting stump formation. Pre-prosthetic rehabilitation includes compression therapy, scar massage, stump hygiene, and phantom pain relief. Compression therapy is provided through knitted materials and products of a given shape with compression properties.*

*During the research, a structure of a tubular knitted material with an elastomeric yarn arrangement in the soil structure was developed in the form of a tuck stitch and float stitch with a 1+1 and 1+3 laying report. The prototypes were produced on a class 13 round hosiery machine with a cylinder diameter of 3.75 inches. In the knitting process, the elastomeric thread's tension was changed by changing the speed of the elastomeric thread feeding into the soil structure. At the same time, the knitting density was changed vertically at three levels.*

*The nature of the soil knitting density effect under the condition of a constant elastomeric yarn feed rate on the deformation characteristics of knitted fabric was revealed. It has been found that under continuous knitting density, the elastomeric yarn's feed rate does not significantly affect the deformation characteristics of knitwear. Due to the introduction of an elastomeric yarn into the knitted material's structure, the residual deformation level is no more than 4 %, indicating a sufficient level of form stability under the influence of operational loads.*

**Key words:** *medical textile, knitted material, deformation of textile material, relaxation of deformation of textile material, cover for stump, elastomeric yarn.*

### Постановка проблеми

В умовах довготривалої війни в Україні одним із важливих наукових напрямів розвитку трикотажного виробництва є створення функціональних трикотажних матеріалів та виробів медичного призначення. На жаль, сьогодні існує сумна статистика щодо кількості військовослужбовців та цивільних осіб із травматичною ампутацією кінцівок [1, 2]. Ефективність реабілітаційних заходів після ампутації значною мірою визначає успішність протезування. Медичний текстиль для догляду за ампутованою кінцівкою у післяопераційний період, на етапі реабілітації та протезування відіграє важливу роль [3, 4]. Використання таких текстильних виробів обумовлено тим, що протези й ортези створюють навантаження на певні зони шкіри, яке виникає внаслідок ампутації кінцівки та порушення кровообігу. Це навантаження може спричинити сильний дискомфорт, зокрема тиск на ділянку ампутації, тертя, потовиділення, що провокує больові відчуття в області контакту кульги з протезом чи ортезом. Реабілітація перед протезуванням включає компресійну терапію, масаж рубців, гігієну кульги та фантомне знеболення. Основною проблемою цього періоду є набряк, і компресійна терапія слугує засобом його запобігання [5-7]. Мета терапії також полягає в корекції формування кульги (запобігання келоїдам і гіпертрофованим рубцям), відновленні рубців та зменшенні фантомного болю [8]. Застосування постійної компресії, вищої за тиск капілярних судин на етапі лікування ампутованих кінцівок впливає на утворення келоїдів і значно запобігає їхній гіпертрофії. При цьому, як показує практика, рубці заживають швидше і рівномірніше [9].

Один із ключових аспектів компресійної терапії полягає у підборі необхідної трикотажної структури, а також технологічних параметрів в'язання, що забезпечать формування необхідних фізико-механічних характеристик трикотажного матеріалу та оптимальну компресію, створювану виробом заданої форми, для лікування ампутованих кінцівок на етапі перед протезуванням [10-12]. Компресійні трикотажні вироби замкнутого контуру зазвичай

виготовляють на круглов'язальному обладнанні малого діаметру з використанням принаймні двох систем ниток: ниток ґрунту та високорозтяжних еластомерних ниток. Ці нитки вводяться у структуру ґрунту з високим натягом перед зоною в'язання. Еластомерні нитки можуть бути інтегровані в структуру пресовими або футерними накидами й протяжками чи у вигляді утокової нитки. Для забезпечення еластичності трикотажного матеріалу в структуру ґрунту також вводять синтетичні текстуровані нитки з еластановим сердечником. Фізико-механічні та експлуатаційні характеристики трикотажного матеріалу залежать від структури переплетення ґрунту та способу введення еластомерних ниток.

Тому розробка компресійних трикотажних матеріалів замкнутого контуру та дослідження їх властивостей є наразі актуальною задачею, вирішення якої сприятиме створенню вітчизняних зразків функціональних трикотажних матеріалів та виробів заданої форми, призначених для виготовлення чохла для культі.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Вироби, призначені для компресійної терапії, складають значну частину виробів медичного текстилю. Наразі компресійна терапія успішно застосовується для лікування ампутованих кінцівок на етапі загоєння ранової поверхні та формування культі. Аналіз різноманітних компресійних чохла для ампутованих кінцівок наведено у роботі [3].

Чохли для ампутованих кінцівок зазвичай виготовляють за технологією круглов'язального трикотажу і представляють собою виріб трубчастої форми з бортом та миском. Інноваційні текстильні технології та дизайн виробів надають широкий спектр можливостей для вдосконалення, оптимізації та індивідуалізації компресійної терапії [7,13].

Науковцями ведеться постійна робота у напрямку створення нових трикотажних матеріалів медичного призначення. Однак процес розробки функціональних трикотажних матеріалів трубчастої форми, що використовуються у виробництві чохла для культі, передбачає вивчення характеру впливу технологічних параметрів на їх деформаційні характеристики під впливом експлуатаційних навантажень.

У роботі [14] автори зазначають, що більшість досліджень властивостей еластичних матеріалів зосереджується на визначенні їх деформаційних характеристик за діаграмами розтягування, а також випробуваннях за циклом навантаження, розвантаження та релаксації. Це обумовлено тим, що необхідний тиск трикотажного матеріалу компресійних виробів на тіло людини забезпечується такими його властивостями, як розтяжність та пружність, а також конструктивними особливостями самих виробів, включно з розмірами та формою.

Автори іншої роботи [15] пропонують здійснювати проектування виробів трубчастої форми з урахуванням деформаційних властивостей трикотажного матеріалу, обґрунтовуючи це тим, що такі вироби зазвичай вдягаються на ділянку тіла з різними значеннями обхвату, розподіленими певним чином по довжині, Тому на етапі проектування таких виробів важливо передбачити можливість автоматичної оцінки рівня комфортності під час їх експлуатації у відповідності до деформаційних характеристик трикотажного матеріалу.

Для оцінки деформаційних властивостей текстильних матеріалів під час одноциклових випробувань зазвичай використовують повну деформацію та її складові. Повна деформація включає швидкооборотну, повільнооборотну та залишкову частки релаксації деформації. При цьому швидкооборотна зникає одразу після зняття навантаження, повільнооборотна має збільшений період релаксації, а залишкова зберігається після зняття напруги. Співвідношення цих складових у трикотажному матеріалі є ключовим для визначення його механічних властивостей. Чим більша частка швидко- і повільнооборотних складових, тим краще виріб зберігає свої лінійні розміри та форму, надану йому у процесі виготовлення. Наявність залишкової деформації вказує на швидку зміну розмірів та форми виробу під час експлуатації та втрату функціональних властивостей. Такі процеси, що чергуються з розвантаженням та відпочинком, впливають на структуру трикотажного матеріалу, спричиняючи зміну його форми та розмірів. Оцінка релаксаційних характеристик трикотажного матеріалу під час розтягування є дуже важливою для визначення його формостійкості [16].

Авторами роботи [17] здійснено порівняльний аналіз різноманітних методів визначення розтяжності еластичного трикотажу в залежності від структури переплетення (кулірний чи оснований'язаний трикотаж), асортиментної групи трикотажних матеріалів. Виходячи з того, що чохла представляють собою вироби трубчастої форми, якої вони набувають безпосередньо у процесі в'язання на круглов'язальному обладнанні малого діаметру (круглопанчійний автомат), у процесі експлуатації при одяганні їх на куксу вони не піддаються значним силовим навантаженням. Тому нами пропонується для оцінки деформаційних властивостей трикотажного матеріалу встановити низький рівень експлуатаційного навантаження, який зазвичай використовують у таких дослідженнях, а саме 6Н.

Аналіз наукових праць за напрямом досліджень дозволив сформулювати мету, задачі досліджень та методи їх реалізації.

#### **Формулювання мети дослідження**

Метою даної роботи є дослідження впливу швидкості подачі еластомерної нитки у зону в'язання, її рапорту в петельній структурі ґрунту та щільності по вертикалі у процесі вироблення на круглов'язальному обладнанні малого діаметру трикотажного матеріалу трубчастої форми на його деформаційні характеристики під впливом експлуатаційних навантажень (деформація та релаксація деформації).

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Релаксаційні характеристики трикотажу є важливим показником для оцінювання стабільності форми текстильного матеріалу під дією експлуатаційних навантажень. Для реалізації поставленої у роботі задачі досліджень використано однофонтурне круглов’язальне обладнання з діаметром циліндра 3,75 дюйма та кількістю працюючих голок 168. Грунт трикотажного матеріалу вироблено платированим переплетенням. У якості платировочної нитки використано бавовняну пряжу лінійної густини 20 текс, у якості ґрунтової – поліамідну текстуровану нитку лінійної густини 4,4 текс з еластаним сердечником. В структуру ґрунту у процесі в’язання трикотажного матеріалу трубчастої форми вводилась еластомерна нитка 7,7 текс з подвійним обплетенням текстурованою поліефірною ниткою 4,4 текс. Дослідні зразки відрізнялися за рапортом прокладання еластомерної нитки: 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.

Деформаційні характеристики розроблених зразків трикотажних матеріалів досліджено у напрямку петельних рядів та петельних стовпчиків на релаксометрі типу «Стіяка» за умови низького рівня експлуатаційного навантаження, рівному 6Н. При виборі зазначеного навантаження для встановлення складових часток деформації (швидкооборотної, повільно-оборотної та залишкової) враховували той факт, що вироби (чохла для культі) з досліджуваних зразків трикотажних матеріалів мають трубчасту форму, одержану безпосередньо у процесі в’язання на круглов’язальному обладнанні малого діаметру, та при експлуатації не зазнаватимуть під час вдягання чохла на культю більших силових навантажень. Для проведення досліджень попередньо підготовлено проби розміром 50×200 мм відповідно з розташуванням у напрямку петельних рядів та петельних стовпчиків. Затискна довжина складала 100 мм. Час навантаження складав 60 хв., час релаксації деформації – 60 хв. У таблиці 1 наведені параметри структури розроблених зразків трикотажних матеріалів, які вже нами охарактеризовані у попередньому дослідженні [3].

Таблиця 1

**Параметри структури розроблених зразків трикотажних матеріалів трубчастої форми**

Номер зразка	Швидкість обертання колеса, що подає еластомерну нитку у зону в’язання n, хв <sup>-1</sup>	Щільність по горизонталі N <sub>c</sub> , см <sup>-1</sup>	Щільність по вертикалі N <sub>p</sub> , см <sup>-1</sup>	Поверхнева густина, т, г/м <sup>2</sup>	Довжина платировочної нитки в петлі, мм	Довжина ґрунтової нитки в петлі, мм	Довжина еластомерної нитки, що припадає на одну петлю ґрунту, мм
рапорт прокладання еластомерної нитки 1+3							
1+3/11/50	50	11	11	481.2	6.1	5.5	0.9
1+3/11/70	70	10		461.6			1.0
1+3/11/90	90	9.5		450.4			1.1
1+3/11/110	110	9		450.0			1.2
1+3/10/50	50	11	10	483.6	6.7	6.1	1.0
1+3/10/70	70	10		480.8			1.1
1+3/10/90	90	9.5		462.0			1.2
1+3/10/110	110	9		456.8			1.3
1+3/9/50	50	11	9	482.4	7.3	6.7	0.9
1+3/9/70	70	10		443.6			1.0
1+3/9/90	90	9.5		428.4			1.1
1+3/9/110	110	9		417.6			1.2
рапорт прокладання еластомерної нитки 1+1							
1+1/11/50	50	11	11	410.8	5.6	5.2	0.9
1+1/11/70	70	10		410.2			1.0
1+1/11/90	90	9		409.2			1.0
1+1/11/110	110	8.5		402.4			1.1
1+1/10/50	50	11	10	414.4	6.2	5.8	0.9
1+1/10/70	70	10		404.0			1.0
1+1/10/90	90	9		390.8			1.1
1+1/10/110	110	8.5		397.6			1.2
1+1/9/50	50	11	9	423.2	6.8	6.4	0.8
1+1/9/70	70	10		416.0			0.9
1+1/9/90	90	9		403.2			1.0
1+1/9/110	110	8.5		400.8			1.1

На підставі одержаних результатів досліджень побудовано відповідні графіки деформації та релаксації деформації відповідно вздовж петельних рядів та стовпчиків, які наведено на рис. 1–8. В цілому, слід зазначити, що пров'язування разом з ниткою ґрунту поліамідної текстурованої нитки з еластановим сердечником та введення еластомерної нитки в структуру ґрунту трикотажного матеріалу сприяє покращенню його пружних властивостей як у напрямку петельних рядів, так і стовпчиків. Це підтверджується мінімальним рівнем залишкової деформації, який складає не більше 4%.

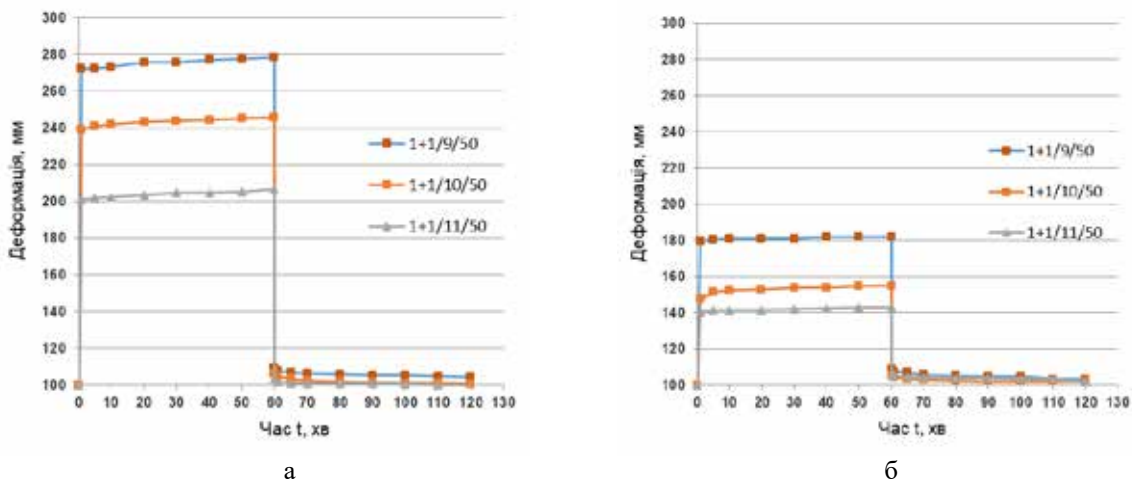


Рис. 1. Графіки деформації-релаксації деформації трикотажного матеріалу, виробленого з рапортом прокладання еластомерної нитки 1+1 за швидкості обертання колеса, що подає еластомерну нитку 50 об/хв: а – вздовж петельного ряду; б – вздовж петельного стовпчика

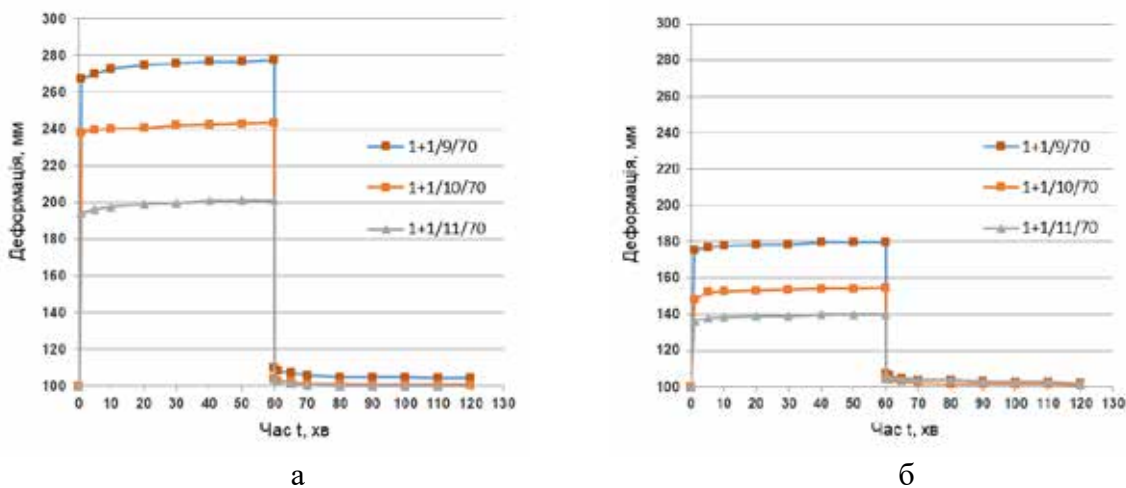


Рис. 2. Графіки деформації-релаксації деформації трикотажного матеріалу, виробленого з рапортом прокладання еластомерної нитки 1+1 за швидкості обертання колеса, що подає еластомерну нитку 70 об/хв

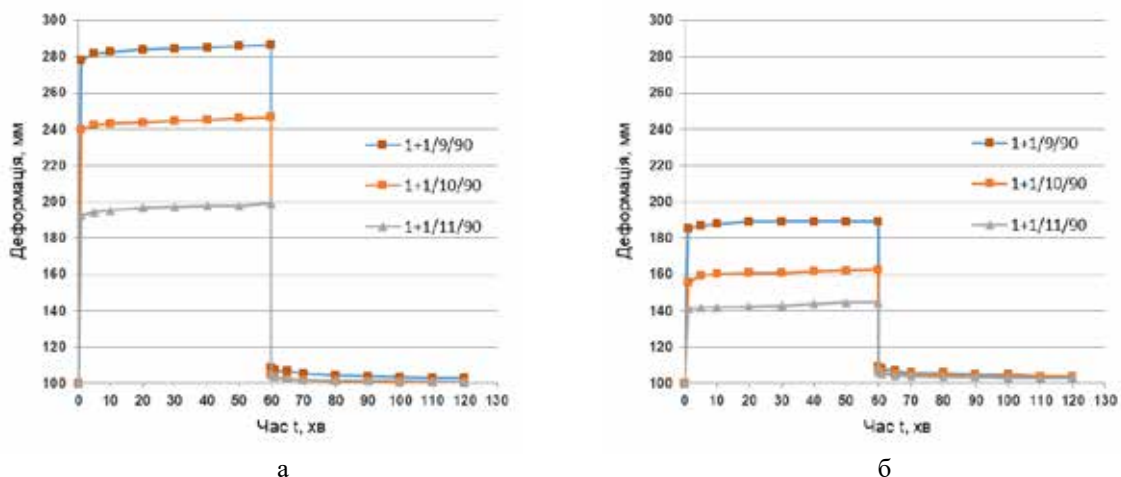


Рис. 3. Графіки деформації-релаксації деформації трикотажного матеріалу, виробленого з рапортом прокладання еластомерної нитки 1+1 за швидкості обертання колеса, що подає еластомерну нитку 90 об/хв

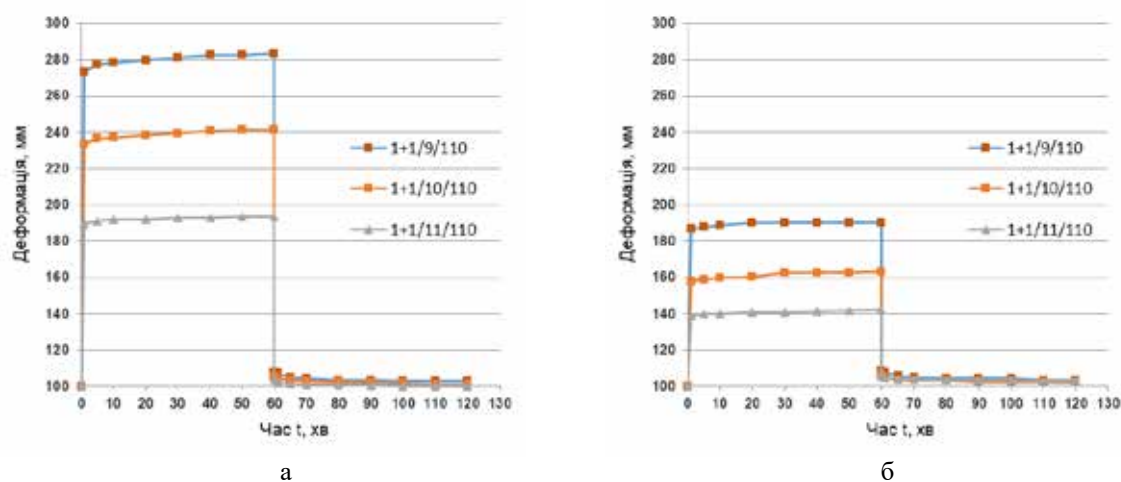


Рис. 4. Графіки деформації-релаксації деформації трикотажного матеріалу, виробленого з рапортом прокладання еластомерної нитки 1+1 за швидкості обертання колеса, що подає еластомерну нитку 110 об/хв

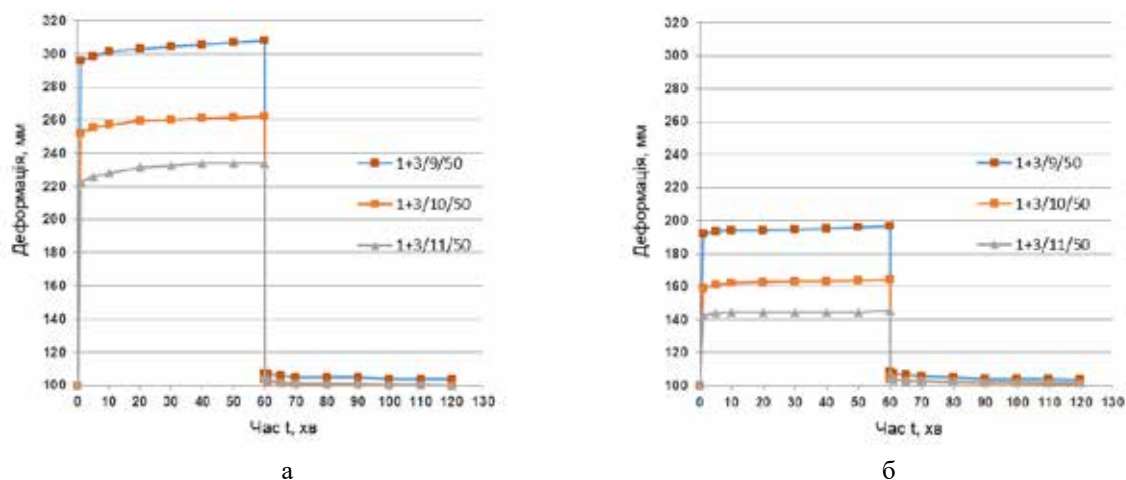


Рис. 5. Графіки деформації-релаксації деформації трикотажного матеріалу, виробленого з рапортом прокладання еластомерної нитки 1+3 за швидкості обертання колеса, що подає еластомерну нитку 50 об/хв



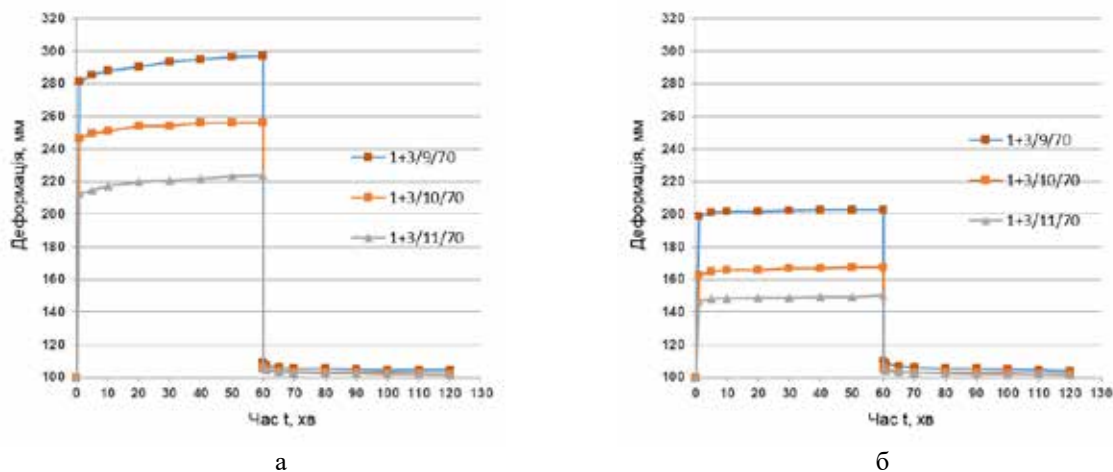


Рис. 6. Графіки деформації-релаксації деформації трикотажного матеріалу, виробленого з рапортом прокладання еластомерної нитки 1+3 за швидкості обертання колеса, що подає еластомерну нитку 70 об/хв

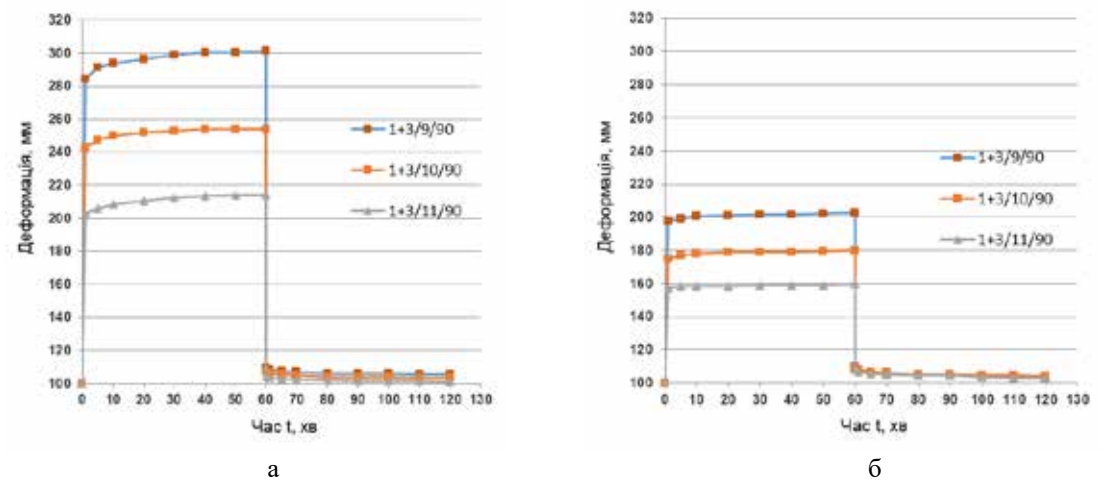


Рис. 7. Графіки деформації-релаксації деформації трикотажного матеріалу, виробленого з рапортом прокладання еластомерної нитки 1+3 за швидкості обертання колеса, що подає еластомерну нитку 90 об/хв

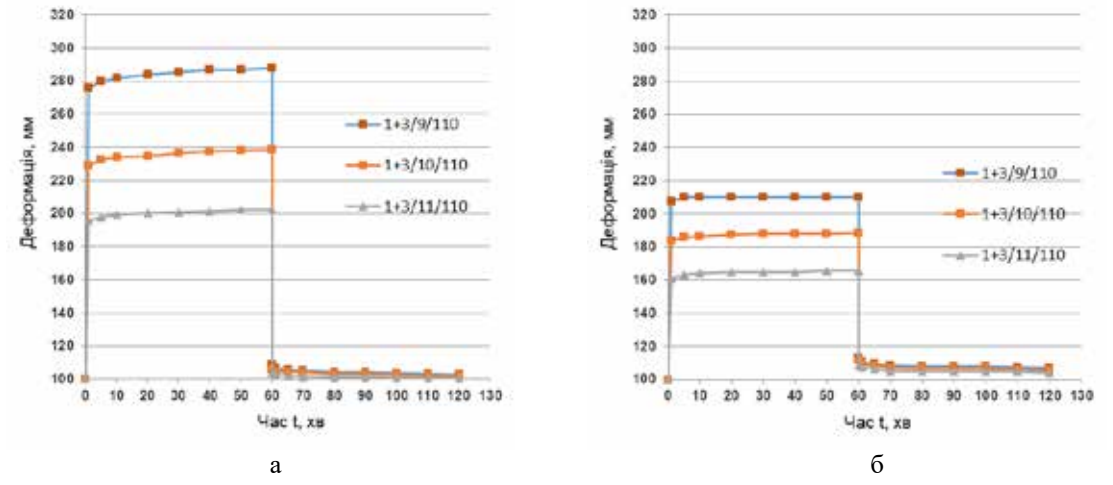


Рис. 8. Графіки деформації-релаксації деформації трикотажного матеріалу, виробленого з рапортом прокладання еластомерної нитки 1+3 за швидкості обертання колеса, що подає еластомерну нитку 110 об/хв

Як видно з графіків, наведених на рис. 1–8, на величину повної деформації під дією експлуатаційного навантаження впливає рапорт прокладання еластомерної нитки. Так, у разі застосування рапорту прокладання 1+3 спостерігаємо більше значення повної деформації як по ширині, так і по довжині. Це пов'язано з утворенням рельєфної поверхні трикотажу (поздовжні валики в місцях розташування еластомерної нитки у вигляді протяжки вздовж 3-х петельних стовпчиків) у випадку рапорту прокладання еластомерної нитки 1+3.

Зміна швидкості подачі еластомерної нитки у зону в'язання у визначеному експериментом діапазоні (швидкість обертання колеса від 50 до 110 об/хв) не має суттєвого впливу на частку залишкової деформації. При цьому зменшення натягу еластомерної нитки призводить до зменшення щільності по горизонталі, а це у свою чергу обумовлює зменшення частки повної деформації трикотажного матеріалу у разі прикладання розтягуючого зусилля у напрямку петельних рядів. У випадку дослідження розтягності зразків у напрямку петельних стовпчиків спостерігаємо протилежну картину – частка повної деформації зростає, що можна пояснити збільшенням податливості структури трикотажного матеріалу до перерозподілу нитки з протяжок в остови петель внаслідок зменшення його щільності.

### Висновки

Тривала війна в Україні привела до зростання частки людей працездатного віку з травматичною ампутацією як серед військовослужбовців, так і серед цивільного населення. Протезування дозволяє повернутися постраждалим до нормального активного способу життя. У період реабілітації перед протезуванням використання функціональних чохлів для кульгів забезпечує компресійну терапію, яка слугує засобом запобігання набряку, та сприяє корекції формування кульги.

В усіх розроблених зразках трикотажних матеріалів частка залишкової деформації не перевищує 4% і зростає зі зменшенням щільності в'язання та збільшенням швидкості подачі еластомерної нитки в зону в'язання. Водночас, на величину повної деформації під дією експлуатаційного навантаження впливає рапорт прокладання еластомерної нитки. Так, у випадку рапорту прокладання 1+3 спостерігаємо більше значення повної деформації як по ширині, так і по довжині. Це пов'язано з утворенням рельєфної поверхні трикотажного матеріалу з рапортом прокладання еластомерної нитки 1+3 (поздовжні валики в місцях розташування еластомерної нитки у вигляді протяжки вздовж 3-х петельних стовпчиків).

Оскільки у структурі петельних рядів містяться еластомерні нитки у вигляді накидів та протяжок, розроблені зразки трикотажних матеріалів демонструють гарну пружність, а відповідно забезпечуватимуть стабільність лінійних розмірів й збереження форми та функціональних властивостей під час експлуатації виробу трубчастої форми.

**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 – ORТОКНИТ)» (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. Tsema, E.V.; Khomenko, I.P.; Bepalenko, A.A.; Buryanov, O.A.; Mishalov, V.G.; Kikh, A.Y. Clinico-Statistical Investigation of the Extremity Amputation Level in Wounded Persons. *Klin. Khirurgiia* 2017, 10, 324–331. ISSN 1392-1207.
2. Melnyk, L.; Halavska, L.; Mikucioniene, D.; Dudnyk, I.; Milasius, R. Assortment and Manufacturing Methods of Stump Socks. In Proceedings of 11th International Young Researchers Conference Industrial Engineering 2024–From Zero to Hero, Kaunas, Lithuania, 9 May 2024; pp. 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. *Appl. Sci.* 2024, 14 (10), 4486. <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. <https://doi.org/10.3390/fib1210080>
5. Shi, Y.; Liu, R.; Lv, J.; Ye, C. Biomedical therapeutic compression textiles: Physical-mechanical property analysis to precise pressure management. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2024, 151, 106392. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2024.106392>
6. Kankariya, N. Material, structure, and design of textile-based compression devices for managing chronic edema. *J. Ind. Text.* 2022, 52. <https://doi.org/10.1177/15280837221118844>
7. 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. *Text. Res. J.* 2017, 87, 1121–1141. <https://doi.org/10.1177/004051751666460>
8. Murray, J.C. Keloids and hypertrophic scars. *Clin. Dermatol.* 1994, 12, 27–37. [https://doi.org/10.1016/0738-081X\(94\)90254-2](https://doi.org/10.1016/0738-081X(94)90254-2)

9. Aboalasaad, A.R.; Sirkova, B.K.; Mansoor, T.; Skenderi, Z.; Khalil, A.S. Theoretical and Experimental Evaluation of Thermal Resistance for Compression Bandages. *Autex Res. J.* 2022, 22, 18–25. <https://doi.org/10.2478/aut-2020-0052>
10. Alisauskienė, D.; Mikucionienė, D. Prediction of Compression of Knitted Orthopaedic Supports by Inlay-Yarn Properties. *Mater. Sci. -Medzg.* 2014, 20, 311–314
11. 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. *J. Ind. Text.* 2022, 51, 2688S–2708S. <https://doi.org/10.1177/1528083720947740>
12. RAL-GZ 387/1:2008; Medical Compression Hosiery, Quality Assurance. RAL Deutsches Institut für Gütesicherung and Kennzeichnung e.V.: Bonn, Germany, 2008
13. 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. *Text. Res. J.* 2019, 89, 5218–5225. <https://doi.org/10.1177/0040517519855319>
14. Кизимчук, О. П., Мельник, Л. М., Гусар, М. Ю., & Латишова, А. А. (2019). Властивості трикотажних матеріалів для компресійних виробів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки.* (5), 108–110. <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/14569>
15. Єліна, Т. В., & Галавська, Л. Є. (2020). Проектування виробів трубочастої форми з урахуванням деформаційних властивостей трикотажу. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки.* (6), 168–174. <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/19017>
16. Кизимчук, О. П., & Мельник, Л. М. (2013). Розтяжність трикотажу переплетення Ластик 1+1, виробленого з армованих еластомерних ниток фірми Gumtex. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки,* (3), 110–114. [http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2013\\_3/23kyz.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2013_3/23kyz.pdf)
17. Кизимчук, О. П., Мельник, Л. М., Токовенко, А. В., Обухевич, С. А. (2019). Порівняння методів визначення розтяжності еластичного трикотажу. *Fashion Industry,* (1), 48–54. <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/14829>

#### References

1. Tsema, E.V.; Khomenko, I.P.; Bepalenko, A.A.; Buryanov, O.A.; Mishalov, V.G.; Kikh, A.Y. Clinico-Statistical Investigation of the Extremity Amputation Level in Wounded Persons. *Klin. Khirurgiia* 2017, 10, 324–331. ISSN 1392-1207.
2. Melnyk, L.; Halavska, L.; Mikucionienė, D.; Dudnyk, I.; Milasius, R. Assortment and Manufacturing Methods of Stump Socks. In Proceedings of 11th International Young Researchers Conference Industrial Engineering 2024–From Zero to Hero, Kaunas, Lithuania, 9 May 2024; pp. 129–131.
3. Mikucionienė, D.; Halavska, L.; Melnyk, L.; Milašius, R.; Laureckienė, G.; Arabuli, S. Classification, Structure and Construction of Functional Orthopaedic Compression Knits for Medical Application: A Review. *Appl. Sci.* 2024, 14 (10), 4486. <https://doi.org/10.3390/app14114486>
4. Mikucionienė, D.; Halavska, L.; Laureckienė, G.; Melnyk, L.; Arabuli, S.; Milašius, R. Development of Knitted Compression Covers for Amputated Limbs: A Review. *Fibers* 2024, 12(10), 80. <https://doi.org/10.3390/fib12100080>
5. Shi, Y.; Liu, R.; Lv, J.; Ye, C. Biomedical therapeutic compression textiles: Physical-mechanical property analysis to precise pressure management. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2024, 151, 106392. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2024.106392>
6. Kankariya, N. Material, structure, and design of textile-based compression devices for managing chronic edema. *J. Ind. Text.* 2022, 52. <https://doi.org/10.1177/15280837221118844>
7. 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. *Text. Res. J.* 2017, 87, 1121–1141. <https://doi.org/10.1177/00405175166460>
8. Murray, J.C. Keloids and hypertrophic scars. *Clin. Dermatol.* 1994, 12, 27–37. [https://doi.org/10.1016/0738-081X\(94\)90254-2](https://doi.org/10.1016/0738-081X(94)90254-2)
9. Aboalasaad, A.R.; Sirkova, B.K.; Mansoor, T.; Skenderi, Z.; Khalil, A.S. Theoretical and Experimental Evaluation of Thermal Resistance for Compression Bandages. *Autex Res. J.* 2022, 22, 18–25. <https://doi.org/10.2478/aut-2020-0052>
10. Alisauskienė, D.; Mikucionienė, D. Prediction of Compression of Knitted Orthopaedic Supports by Inlay-Yarn Properties. *Mater. Sci. -Medzg.* 2014, 20, 311–314
11. 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. *J. Ind. Text.* 2022, 51, 2688S–2708S. <https://doi.org/10.1177/1528083720947740>
12. RAL-GZ 387/1:2008; Medical Compression Hosiery, Quality Assurance. RAL Deutsches Institut für Gütesicherung and Kennzeichnung e.V.: Bonn, Germany, 2008
13. 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. *Text. Res. J.* 2019, 89, 5218–5225. <https://doi.org/10.1177/0040517519855319>

14. Kyzymchuk, O. P., Melnyk, L. M., Husar, M. Yu., & Latyshova, A. A. (2019). Vlastyvosti trykotazhnykh materialiv dlia kompresiinykh vyrobiv. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky.* (5), 103-108. <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/14569>
15. Ielina, T. V., & Halavska, L. Ye. (2020). Proiektuvannia vyrobiv trubchastoi formy z urakhuvanniam deformatsiinykh vlastyvostei trykotazhu. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky.* (6), 168-174. <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/19017>
16. Kyzymchuk, O. P., & Melnyk, L. M. (2013). Roztiazhnist trykotazhu perepletennia Lastyk 1+1, vyroblenoho z armovanykh elastomernykh nytok firmy Gumex. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky,* (3), 110-114. [http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2013\\_3/23kyz.pdf](http://journals.khnu.km.ua/vestnik/pdf/tech/2013_3/23kyz.pdf)
17. Kyzymchuk, O. P., Melnyk, L. M., Tokovenko, A. V., Obukhevych, S. A. (2019). Porivniannia metodiv vyznachennia roztiazhnosti elastychnoho trykotazhu. *Fashion Industry,* (1), 48-54. <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/14829>

**О. М. КАМІНСЬКИЙ**

кандидат хімічних наук, доцент,  
доцент кафедри хімії  
Житомирський державний університет імені Івана Франка  
ORCID: 0000-0003-1971-8437

**Р. О. ДЕНИСЮК**

кандидат хімічних наук, доцент,  
доцент кафедри хімії  
Житомирський державний університет імені Івана Франка  
ORCID: 0000-0003-3077-3795

**М. В. ЧАЙКА**

кандидат хімічних наук, доцент,  
доцент кафедри хімії  
Житомирський державний університет імені Івана Франка  
ORCID: 0000-0001-5356-9856

**С. В. ПИСАРЕНКО**

доктор філософії з галузі знань хімічна та біоінженерія,  
асистент кафедри хімії  
Житомирський державний університет імені Івана Франка  
ORCID: 0000-0002-5978-487X

**О. С. ЄВДОЧЕНКО**

доктор філософії з галузі знань 01 Освіта/Педагогіка,  
доцент кафедри хімії  
Житомирський державний університет імені Івана Франка  
ORCID: 0000-0001-6338-5372

**О. В. АНІЧКІНА**

кандидат педагогічних наук, доцент,  
завідувач кафедри хімії  
Житомирський державний університет імені Івана Франка  
ORCID: 0000-0003-4843-0707

**О. Ю. АВДЄЄВА**

доктор філософії з галузі знань 01 Освіта/Педагогіка, доцент,  
доцент кафедри хімії  
Житомирський державний університет імені Івана Франка  
ORCID: 0000-0001-6550-0776

**Ю. В. ЛИСЕЦЬКА**

асистент, старший викладач кафедри англійської філології та перекладу  
Житомирський державний університет імені Івана Франка  
ORCID: 0000-0002-6747-5858

## АДСОРБЦІЯ КОНГО ЧЕРВОНОГО З РОЗЧИНУ ПОВЕРХНЕЮ НІКЕЛЬ-ІТРІЄВОГО ГРАНАТУ

*На сучасному етапі розвитку нанохімії та нанотехнологій складнооксидні матеріали зі структурою шпінелі викликають великий інтерес у дослідників. До таких матеріалів належать ітрієві гранати. Завдяки ізоморфним заміщенням, широко дозволеним у структурі гранатів, можна отримати матеріали із унікальним набором фізико-хімічних властивостей шляхом включення нових елементів, наприклад Ni.*

*Для дослідження процесів адсорбції конго червоного з водних розчинів синтезовано нікель-ітрієвий гранат золь-гель методом автогоріння (Печіні). Отримані зразки досліджено методами рентгенофлуоресцентної та ІЧ-Фур'є спектроскопії. На основі елементного аналізу визначено, що формула нікель-ітрієвого гранату становить  $Ni_2Y_9O_{14}$ , а утворені частинки схильні до агрегації.*

У роботі проведено адсорбцію конго червоного з водних розчинів поверхнею нікель-ітрієвого гранату. Встановлено, що ступінь вилучення барвника понад 78% за температури 293 К досягається за перші 30 хвилин від початку контакту адсорбат-адсорбент. Адсорбційна рівновага на межі поділу задовільно описується кінетичною моделлю псевдо-другого порядку. Визначено, що адсорбційна ємність становить 3,14 мг/г, а характер кривої ізотерми нагадує криві ізотерм Ленгмюра (L3-тип) відповідно до класифікації Гільса, без виходу на насичення. Такий тип ізотерм характерний для адсорбентів з малою енергією взаємодії адсорбат-адсорбент.

Показано, що ізотерми адсорбції задовільно описуються моделлю мономолекулярної адсорбції Фрейндліха, в порівнянні з іншими моделями, про що свідчить коефіцієнт кореляції ( $R^2 = 0,973$ ). Це означає, що адсорбція барвника проходить на гетерогенних (нерівноцінних) центрах поверхні, на яких відбувається нерівномірний розподіл за енергіями.

Розраховано, що для адсорбції конго червоного величина енергії адсорбції становить 2,06 кДж/моль, що вказує на суто фізичну адсорбцію молекул барвника на поверхні.

**Ключові слова:** нікель-ітрієвий гранат, наноадсорбент, адсорбція барвників, конго червоний, ізотерми адсорбції, моделі ізотерм.

O. M. KAMINSKIY

Ph.D. in Chemistry,  
Associate Professor at the Department of Chemistry  
Zhytomyr Ivan Franko State University  
ORCID: 0000-0003-1971-8437

R. O. DENYSIUK

Ph.D. in Chemistry,  
Associate Professor at the Department of Chemistry  
Zhytomyr Ivan Franko State University  
ORCID: 0000-0003-3077-3795

M. V. CHAYKA

Ph.D. in Chemistry,  
Associate Professor at the Department of Chemistry  
Zhytomyr Ivan Franko State University  
ORCID: 0000-0002-5978-487X

S. V. PYSARENKO

Ph.D. in the Field of Knowledge "Chemical and Bioengineering",  
Assistant at the Department of Chemistry  
Zhytomyr Ivan Franko State University  
ORCID: 0000-0002-5978-487X

O. S. YEVDCHENKO

Ph.D. in the Field of Knowledge 01 Education/Pedagogy,  
Associate Professor at the Department of Chemistry  
Zhytomyr Ivan Franko State University  
ORCID: 0000-0001-6338-5372

O. V. ANICHKINA

Ph.D. in Pedagogical Sciences, Associate Professor,  
Head of the Department of Chemistry  
Zhytomyr Ivan Franko State University  
ORCID: 0000-0003-4843-0707

O. YU. AVDIEIEVA

Ph.D. in the Field of Knowledge 01 Education/Pedagogy,  
Associate Professor at the Department of Chemistry  
Zhytomyr Ivan Franko State University  
ORCID: 0000-0001-6550-0776

YU. V. LYSETSKA

Assistant,  
Senior Lecturer at the Department of English Philology and Translation  
Zhytomyr Ivan Franko State University  
ORCID: 0000-0002-6747-5858

## ADSORPTION OF CONGO RED FROM A NICKEL-YTTRIUM GARNET SURFACE SOLUTION

*At the current stage of development of nanochemistry and nanotechnology, complex oxide materials with a spinel structure are of great interest to researchers. Such materials include yttrium garnets. Thanks to the isomorphous substitutions widely allowed in the structure of garnets, it is possible to obtain materials with a unique set of physicochemical properties by incorporating new elements, such as Ni.*

*To study the processes of adsorption of Congo red from aqueous solutions, nickel-yttrium garnet sol-gel was synthesized by the self-combustion method (Pechini). The obtained samples were investigated by the methods of X-ray fluorescence and IR-Fourier spectroscopy. On the basis of elemental analysis, it was established that the formula of nickel-yttrium garnet is  $Ni_2Y_9O_{14}$ , and the formed particles are prone to aggregation.*

*In the work, the adsorption of Congo red from aqueous solutions on the surface of nickel-yttrium garnet was carried out. It was established that the degree of dye extraction of more than 78% at a temperature of 293 K is achieved in the first 30 minutes from the beginning of adsorbate-adsorbent contact. The adsorption equilibrium at the separation boundary is satisfactorily described by the pseudo-second-order model. It was determined that the adsorption capacity is 3.14 mg/g, and the character of the isotherm curve resembles the Langmuir isotherm curves (L3-type) according to the Giles classification, without reaching saturation. This type of isotherm is typical for adsorbents with low energy of adsorbent-adsorbate interaction.*

*It is shown that the adsorption isotherms are satisfactorily described by the Freundlich monomolecular adsorption model, compared to other models, as evidenced by the correlation coefficient ( $R^2 = 0.973$ ). This means that dye adsorption occurs on heterogeneous (unequal) centers of the surface, on which there is an uneven energy distribution.*

*It was calculated that for the adsorption of Congo red, the value of the adsorption energy is 2.06 kJ/mol, which indicates a purely physical adsorption of dye molecules on the surface.*

**Key words:** nickel-yttrium garnet, nanoadsorbent, adsorption of dyes, Congo red, adsorption isotherms, isotherm models.

## Постановка проблеми

Адсорбційна активність ітрієвих наноматеріалів зі структурою шпінелі може бути корисною у різних сферах людської діяльності, наприклад для медичних досліджень (вилучення токсинів або лікування захворювань шляхом видалення шкідливих сполук з організму). Широка варіативність методів синтезу матеріалів на основі Ітрію дають можливість використовувати їх у якості нових каталізаторів, наноматеріалів та високоефективних адсорбентів.

Конго червоний – це синтетичний аніонний азобарвник, який використовується в багатьох галузях промисловості, і стічні води, що містять його, необхідно належним чином очищати перед скиданням у навколишнє середовище, оскільки цей барвник може метаболізуватися до бензидину, що є канцерогеном для людини [1-3].

Вилучення конго червоного зі стічних вод є актуальною та важливою проблемою очистки навколишнього середовища та водойм, тому саме цей барвник обрано у якості об'єкта для досліджень. Зазначимо, що сполуки зі структурою шпінелі є перспективними адсорбентами для вилучення барвників з водних розчинів, в тому числі конго червоного [4].

## Аналіз останніх досліджень і публікацій

Авторами у роботі [5] проведено сольватотермічний синтез мікро/наноstrukturованих мікросфер нікель гідроксиду карбонату з використанням етиленгліколю. Хімічний склад зразків визначено методами рентгенівської дифракції (XRD), інфрачервоної спектроскопії з перетворенням Фур'є (FTIR), рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (EDX) та термогравіметричного аналізу (TGA). Після прожарювання виготовлено мезопористі мікро/наноstrukturовані мікросфери NiO з великою площею поверхні 185,1 м<sup>2</sup>/г. Адсорбційну активність вивчено на прикладі барвника конго червоного (CR). Показано, що ізотерма адсорбції CR описується моделлю Ленгмюра, а максимальна адсорбційна ємність становить 456,8 мг/г. Кінетику адсорбції конго червоного описано моделлю псевдо-другого порядку та показано, що протягом однієї хвилини вилучається понад 99,41% CR з розчину за початкової концентрації барвника 300 мг/л. Розраховано термодинамічні параметри (зміну ентальпії, зміну вільної енергії Гіббса, зміну ентропії) та відмічено, що адсорбція CR на мікросферах NiO є самочинним ендотермічним процесом.

Авторами [6] вилучено барвник конго червоний з імітованого розчину стічної води для текстилю за допомогою летючої золи з місцевої електростанції. Зразки адсорбенту досліджено методами скануючої електронної мікроскопії (SEM), EDX, XRD, FTIR, BET-площі поверхні та TGA. Проаналізовано вплив чотирьох параметрів (час контакту, початкової концентрації, дози адсорбенту та температури) на адсорбційну здатність золи. Показано, що адсорбційна рівновага описується кінетичною моделлю псевдо-другого порядку з лімітуючою стадією хемосорбції. Ізотерму адсорбції описано моделлю Ленгмюра з максимальною адсорбційною ємністю 22,12 мг/г.

Однак, джерел, що описують процеси адсорбції конго червоного з водних розчинів поверхнями нікель-ітрієвого гранату зустрічається дуже мало, що підтверджує актуальність даної роботи.

### Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є вивчення процесів адсорбції барвника конго червоного з водних розчинів поверхнею нанорозмірного нікель-ітрієвого гранату.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Для дослідження процесів адсорбції синтезовано нікель-ітрієвий гранат зі структурою шпінелі золь-гель методом автогоріння (Печіні) за подібною методикою, що описано у роботі [7]:

Суміш солей  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  марки «ч.», масою 2,91 г;  $\text{Y}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  марки «ч.д.а.», масою 7,72 г; та 6,3 г лимонної кислоти ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) марки «ч.д.а.» розчиняли в 50 мл дистильованої води. До одержаного розчину додавали 12 мл 25% розчину амоніаку (марки «ч.д.а.») порціями по 2 мл для підтримання  $\text{pH} \approx 8$ . Розчин перенесли у високу склянку на 250 мл і нагрівали на електричній плитці до повного випаровування розчинника з утворенням густого гелю, який після висихання самоспалахував (відбувалося автогоріння з утворенням пухкої маси нанодисперсного гранату).

Після закінчення реакції автогоріння одержану масу синтезованого нікель-ітрієвого гранату розтирали в ступці, промивали 5–7 разів невеликою кількістю дистильованої води до нейтральної реакції середовища та висушували на повітрі.

Для визначення структури одержаного нікель-ітрієвого гранату та кількісного співвідношення між компонентами проведено рентгенофлуоресцентний спектральний аналіз за допомогою енергодисперсійного рентгенофлуоресцентного спектрометра «ELVAX» Model SER-01». Обробка отриманих результатів здійснювалась за допомогою програми ElvaX Software ver. 4.1.8 за методом фундаментальних параметрів (точність визначення  $\pm 0,1\%$ ).

На рис. 1 показано рентгеноспектрограму зразка нікель-ітрієвого гранату.

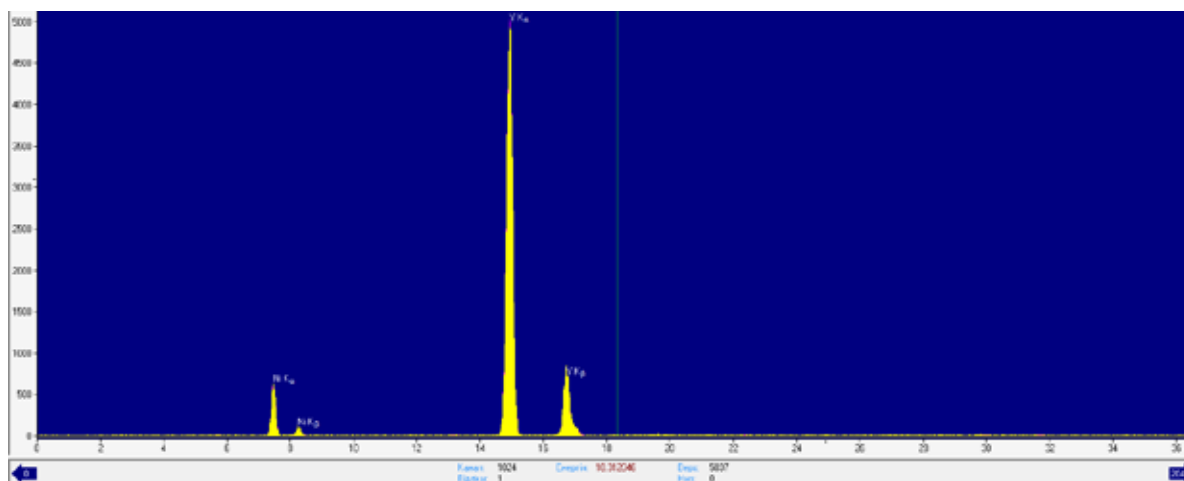


Рис. 1. Рентгеноспектрограма синтезованого нікель-ітрієвого гранату.

За даними рентгенофлуоресцентного спектрального аналізу встановлено, що нікель-ітрієвий гранат має такий усереднений склад: 69,8% Ітрію, 10,4% Ніколу та 19,8% Оксигену. Таким чином формула синтезованого нікель-ітрієвого гранату становить:  $\text{Ni}_2\text{Y}_9\text{O}_{14}$ .

Методами ІЧ-Фур'є спектроскопії з використанням спектрофотометра з перетворенням Фур'є «AGILENT CARY 630» в спектральному діапазоні  $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$  ідентифіковано зв'язки у структурі нікель-ітрієвого гранату.

Виявлено СП при  $800\text{--}700\text{ cm}^{-1}$  валентних коливань  $\text{Y} - \text{O}$  зв'язків додекадрів координованого Ітрію (елементарної комірки ітрієвого гранату), що характерно для гранатів зі структурою шпінелі [8].

Для вивчення процесів адсорбції конго червоного з розчинів готували розчини з концентраціями 2–12 мг/л шляхом кількісного розведення маточного розчину (50 мг/л) та доведення відібраного об'єму дистильованою водою до мітки у мірній колбі на 250 мл.

Для проведення кінетичних досліджень відважували на електронних вагах по 0,06 г зразків, додавали 25 мл розчину барвника з  $C_0 = 6\text{ mg/l}$  та перемішували на шейкері. Час контакту між розчином та адсорбентом обрано: 5, 10, 30, 60 та 90 хв. Температура, за якої проводилось дослідження, становила 293К.

Адсорбцію здійснювали у статичному режимі. Для побудови кривих ізотерм адсорбції використано діапазон концентрацій розчинів барвника: 2, 4, 6, 8 та 10 мг/л. Маса зразків адсорбенту становили 0,06 г кожен, об'єм розчину барвника – 25 мл, час контакту між адсорбатом і адсорбентом становив 90 хв.

Концентрацію конго червоного до та після адсорбції визначали за допомогою КФК-2 за довжини хвилі 490 нм. У якості розчину порівняння використовували дистильовану воду.



Адсорбційну ємність  $A$  (мг/г) на поверхні нікель-ітрієвого гранату розраховували за формулою:

$$A = \frac{(C_0 - C_p) \cdot V}{m}, \quad (1)$$

де  $C_0$  і  $C_p$  – концентрація вихідного розчину барвника та розчину після адсорбції (мг/л),  $V$  – об'єм розчину (л),  $m$  – наважка адсорбенту (г).

Ступінь вилучення  $R$ , % конго червоного з водних розчинів розраховували за формулою:

$$R = \frac{(C_0 - C_p)}{C_0} \cdot 100\% \quad (2)$$

Для обробки одержаних ізотерм адсорбції барвника використано математичні моделі адсорбції Ленгмюра, Фрейндліха, Тьомкіна та Дубініна-Радушкевича [9–11].

На рис. 2 показано залежність ступеня вилучення конго червоного з розчину поверхнею нікель-ітрієвого гранату від часу контакту.

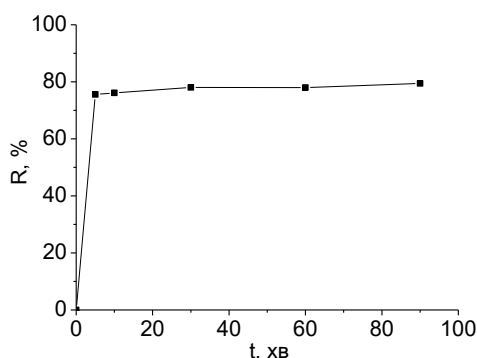


Рис. 2. Залежність ступеня вилучення конго червоного з розчину поверхнею нікель-ітрієвого гранату від часу контакту

Визначено, що ступінь вилучення барвника за перші 30 хвилин від початку адсорбції становить 78,05%, а максимального значення (79,47%) досягає після 90 хвилин від початку взаємодії адсорбат-адсорбент. Адсорбційна рівновага настає протягом 20 хвилин від початку контакту на межі поділу фаз та задовільно описується моделлю псевдо-другого порядку, що вказує на міжчастинкову взаємодію між молекулами адсорбату в об'ємі розчину. Лімітуючою стадією в даному випадку є хімічна реакція обміну між частинками на межі поділу адсорбат-адсорбент.

На рис. 3 зображено ізотерму адсорбції барвника поверхнею нікель-ітрієвого гранату.

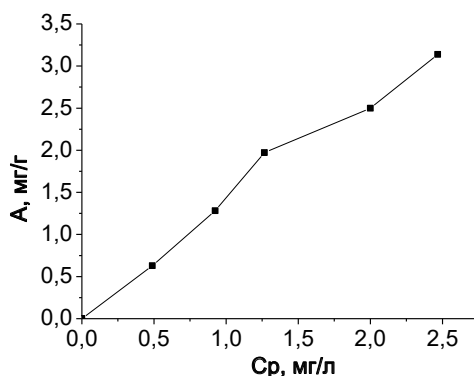


Рис. 3. Ізотерма адсорбції конго червоного з розчину поверхнею нікель-ітрієвого гранату

Як видно з рис. 3, характер кривої ізотерми нагадує криві ізотерм Ленгмюра (L3-тип) відповідно до класифікації Гільса, без виходу на насичення. Такий тип ізотерм характерний для адсорбентів з малою енергією взаємодії адсорбент-адсорбат. Адсорбційна ємність становить 3,14 мг/г.

Одержані експериментальні дані проаналізовано відповідно до моделей ізотерм Ленгмюра, Фрейндліха, Тьомкіна та Дубініна-Радушкевича.

Показано, що ізотерма адсорбції конго червоного задовільно описується моделлю Фрейндліха, в порівнянні з іншими моделями, про що свідчить коефіцієнт кореляції ( $R^2 = 0,973$ ). Це означає, що адсорбція барвника відбувається на гетерогенних (нерівноцінних) центрах поверхні, на яких відбувається нерівномірний розподіл за енергіями.

Для адсорбції конго червоного величина енергії адсорбції  $E$  (кДж/моль) становить 2,06 кДж/моль, що вказує на суто фізичну адсорбцію молекул барвника на поверхні.

#### Висновки

У роботі проведено синтез нікель-ітрієвого гранату золь-гель методом автогоріння (Печіні). Методами рентгенофлуоресцентного спектрального аналізу встановлено формулу синтезованого нікель-ітрієвого гранату –  $Ni_2Y_9O_{14}$ . Методами ІЧ-Фур'є спектроскопії ідентифіковано зв'язки Y – O додекаедрів координованого Ітрію, що характерно для гранатів зі структурою шпінелі.

Проведено адсорбцію барвника конго червоного з водних розчинів поверхнею нікель-ітрієвого гранату. Визначено, що ступінь вилучення барвника за перші 30 хвилин від початку адсорбції становить 78,05%, а максимального значення (79,47%) досягає після 90 хвилин від початку взаємодії адсорбат-адсорбент. Адсорбційна рівновага настає протягом 20 хвилин від початку контакту та задовільно описується кінетичною моделлю псевдо-другого порядку. Визначено, що адсорбційна ємність становить 3,14 мг/г. Показано, що ізотерма адсорбції конго червоного задовільно описується моделлю Фрейндліха. Це означає, що адсорбція барвника відбувається на гетерогенних (нерівноцінних) центрах поверхні, на яких відбувається нерівномірний розподіл за енергіями. Для адсорбції конго червоного величина енергії адсорбції становить 2,06 кДж/моль, що вказує на суто фізичну адсорбцію молекул барвника на поверхні. Показано перспективність використання нікель-ітрієвого гранату у якості наноадсорбенту для очистки води від барвника конго червоного.

#### Список використаної літератури

1. Liu S., Ding Y., Li P., et al. Adsorption of the anionic dye Congo red from aqueous solution onto natural zeolites modified with N,N-dimethyl dehydroabietylamine oxide. *Chemical Engineering Journal*. 2014. Vol. 248. P. 135-144. DOI: 10.1016/j.cej.2014.03.026.
2. Yang Q., Song H., Li Y., et al. Flower-like core-shell  $Fe_3O_4@MnO_2$  microspheres: Synthesis and selective removal of Congo red dye from aqueous solution. *Journal of Molecular Liquids*. 2017. Vol. 234. P. 18-23. DOI: 10.1016/j.molliq.2017.03.028.
3. Xiong Z., Zheng H., Hu Y., et al. Selective adsorption of Congo red and Cu(II) from complex wastewater by core-shell structured magnetic carbon@zeolitic imidazolate frameworks-8 nanocomposites. *Separation and Purification Technology*. 2021. Vol. 277. 119053. DOI:10.1016/j.seppur.2021.119053.
4. Liu J., Wang N., Zhang H., Baeyens J. Adsorption of Congo red dye on  $Fe_xCo_{3-x}O_4$  nanoparticles. *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 238. P. 473-483. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.03.009.
5. Jia Y., Ni J., Wu P.-Y., Fang F., Zhang Y.-X. Fast removal of Congo red from aqueous solution by adsorption onto micro/nanostructured NiO microspheres. *Materials Science and Engineering: B*. 2021. Vol. 270. 115228. DOI: 10.1016/j.mseb.2021.115228.
6. Harja M., Buema G., Bucur D. Recent advances in removal of Congo Red dye by adsorption using an industrial waste. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. 115228. DOI: 10.1038/s41598-022-10093-3.
7. Бушкова В. С., Остафійчук Б. К., Копаєв О.В. Особливості синтезу складних оксидних систем з використанням ЗГА-методу. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2014. Т. 15, № 1. С. 182-185. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/PhKhTT\\_2014\\_15\\_1\\_29](http://nbuv.gov.ua/UJRN/PhKhTT_2014_15_1_29).
8. Modi K. B., Vara R. P., Vora H. G., Chhantbar M. C., Joshia H. H. Infrared spectroscopic study of  $Fe^{3+}$  substituted yttrium iron garnet. *Journal of materials science*. 2004. Vol. 39. P. 2187-2189.
9. Tripathy S., Raichur A. Abatement of fluoride from water using manganese dioxide-coated activated alumina. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 153, No 3. P. 1043-1051. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.100
10. Onyango M., Kojima Y., Aoyi O., Bernardo E., Matsuda H. Adsorption equilibrium modeling and solution chemistry dependence of fluoride removal from water by trivalent-cation-exchanged zeolite F-9. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 279, No 2. P. 341-350. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.06.038.
11. Камінський О. М., Денисюк Р. О., Чайка М. В., Писаренко С. В., Панасюк Д. Ю. Сорбція йонних форм Цинку(II) з водних розчинів поверхнями магніточутливих нанокомпозитів, модифікованих гідроксиапатитом. *Український журнал природничих наук*. 2023. № 5. С. 70-79. DOI: 10.32782/naturaljournal.5.2023.8.

#### References

1. Liu S., Ding Y., Li P., et al. (2014) Adsorption of the anionic dye Congo red from aqueous solution onto natural zeolites modified with N,N-dimethyl dehydroabietylamine oxide. *Chemical Engineering Journal*. Vol. 248. P. 135-144. DOI: 10.1016/j.cej.2014.03.026.

2. Yang Q., Song H., Li Y., et al. (2017) Flower-like core-shell Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@MnO<sub>2</sub> microspheres: Synthesis and selective removal of Congo red dye from aqueous solution. *Journal of Molecular Liquids*. Vol. 234. P. 18-23. DOI: 10.1016/j.molliq.2017.03.028.
3. Xiong Z., Zheng H., Hu Y., et al. (2021) Selective adsorption of Congo red and Cu(II) from complex wastewater by core-shell structured magnetic carbon@zeolitic imidazolate frameworks-8 nanocomposites. *Separation and Purification Technology*. Vol. 277. 119053. DOI:10.1016/j.seppur.2021.119053.
4. Liu J., Wang N., Zhang H., Baeyens J. (2019) Adsorption of Congo red dye on Fe<sub>x</sub>Co<sub>3-x</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles. *Journal of Environmental Management*. Vol. 238. P. 473-483. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.03.009.
5. Jia Y., Ni J., Wu P.-Y., Fang F., Zhang Y.-X. (2021) Fast removal of Congo red from aqueous solution by adsorption onto micro/nanostructured NiO microspheres. *Materials Science and Engineering: B*. Vol. 270. 115228. DOI: 10.1016/j.mseb.2021.115228.
6. Harja M., Buema G., Bucur D. (2022) Recent advances in removal of Congo Red dye by adsorption using an industrial waste. *Scientific Reports*. Vol. 12. 115228. DOI: 10.1038/s41598-022-10093-3.
7. Bushkova V. S., Ostafiychuk B. K., Kopayev O.V. (2014) Osoblyvosti syntezy skladnykh oksydneykh system z vykorystanniam ZHA-metodu. [Peculiarities of the synthesis of complex oxide systems using the ZHA method]. *Fizyka i khimiya tverdoho tila*. T. 15, № 1. C. 182-185. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/PhKhTT\\_2014\\_15\\_1\\_29](http://nbuv.gov.ua/UJRN/PhKhTT_2014_15_1_29). [in Ukrainian]
8. Modi K. B., Vara R. P., Vora H. G., Chhantbar M. C., Joshia H. H. (2004) Infrared spectroscopic study of Fe<sup>3+</sup> substituted yttrium iron garnet. *Journal of materials science*. Vol. 39. P. 2187-2189.
9. Tripathy S., Raichur A. (2008) Abatement of fluoride from water using manganese dioxide-coated activated alumina. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 153, No 3. P. 1043-1051. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.100
10. Onyango M., Kojima Y., Aoyi O., Bernardo E., Matsuda H. (2004) Adsorption equilibrium modeling and solution chemistry dependence of fluoride removal from water by trivalent-cation-exchanged zeolite F-9. *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 279, No 2. P. 341-350. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.06.038.
11. Kaminskyi O. M., Denysiuk R. O., Chaika M. V., Pysarenko S. V., Panasiuk D. Yu. (2023) Sorbttsiia yonnykh form Tsynku(II) z vodnykh rozchyniv poverkhniamy mahnitochutlyvykh nanokompozytiv, modyfikovanykh hidroksyapatytom [Sorption of ionic forms of Zinc (II) from aqueous solutions by surfaces of magneto-sensitive nanocomposites modified with hydroxyapatite]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychyykh nauk*. № 5. S. 70-79. DOI: 10.32782/naturaljournal.5.2023.8. [in Ukrainian]

**О. М. КАМІНСЬКИЙ**

кандидат хімічних наук, доцент,  
доцент кафедри хімії  
Житомирський державний університет імені Івана Франка  
ORCID: 0000-0003-1971-8437

**Р. О. ДЕНИСЮК**

кандидат хімічних наук, доцент,  
доцент кафедри хімії  
Житомирський державний університет імені Івана Франка  
ORCID: 0000-0003-3077-3795

**М. В. ЧАЙКА**

кандидат хімічних наук, доцент,  
доцент кафедри хімії  
Житомирський державний університет імені Івана Франка  
ORCID: 0000-0001-5356-9856

**С. В. ПИСАРЕНКО**

доктор філософії з галузі знань хімічна та біоінженерія,  
асистент кафедри хімії  
Житомирський державний університет імені Івана Франка  
ORCID: 0000-0002-5978-487X

**О. С. ЄВДОЧЕНКО**

доктор філософії з галузі знань 01 Освіта/Педагогіка,  
доцент кафедри хімії  
Житомирський державний університет імені Івана Франка  
ORCID: 0000-0001-6338-5372

**Д. Ю. ПАНАСЮК**

асистент кафедри хімії  
Житомирський державний університет імені Івана Франка  
ORCID: 0009-0005-9490-1823

## АДСОРБЦІЙНА ОЧИСТКА ВОДИ ВІД ІОНІВ Cd(II) МАГНІТОЧУТЛИВИМ НАНОАДСОРБЕНТОМ Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/ГІДРОКСИАПАТИТ

*В Україні як ніколи гостро стоїть проблема боротьби з наслідками стихійних забруднень навколишнього середовища, природних водойм та ґрунтів, а також харчових продуктів, зокрема питної води. Також потенційну небезпеку несуть забруднювачі воєнного походження (залишки снарядів, техніки, зброї тощо). Надзвичайно шкідливими забруднювачами є іони важких металів, наприклад Феруму, Купруму, Мангану, Кадмію та інших. Накопичення таких забруднювачів в організмі живих істот призводить до різноманітних патологій, розвитку та посилення захворювань. Однією з причин такого впливу іонів важких металів на живі організми є те, що їх досить важко вивести з організму, що тільки загострює проблему.*

*Відповідно до Директиви ЄС «Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption» одним із важливих харчових продуктів визнано питну воду, для якої прийняті стандарти вмісту важких металів, зокрема кадмію, та інших забруднювачів (барвники, пестициди, гербіциди тощо).*

*З метою вивчення можливості адсорбційного вилучення іонів Cd(II) з водних розчинів проведено синтез магнетиту золь – гель методом співсадження Елмора. Синтезовані зразки досліджено методами ТЕМ-мікроскопії та встановлено, що частинки Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> кулястої форми, схильні до утворення агрегатів. Розмір кристалітів становить 3–23 нм. Здійснено модифікування поверхні магнетиту гідроксиапатитом з метою одержання магніточутливого наноадсорбента щодо вилучення іонів Cd(II). За допомогою ТЕМ встановлено відсутність впливу модифікування поверхні магнетиту на розмір та морфологію частинок.*

*Здійснено порівняльний аналіз адсорбції іонів Cd(II) з водних розчинів поверхнями Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> та Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/гідроксиапатит. Встановлено, що ступінь вилучення понад 60,0 % іонів Cd(II) з водного розчину у діапазоні рН = 7,9–8,1 за*

температури 293 К досягається за перші 60–90 хвилин від початку контакту адсорбат – адсорбент. Адсорбційна рівновага на межі поділу для обох поверхонь задовільно описується моделлю псевдо-другого порядку. Визначено, що адсорбційна ємність становить 21,1 та 22,3 мг/г для поверхонь  $Fe_3O_4$  та  $Fe_3O_4$ /гідроксиапатит відповідно. Показано, що ізотерми адсорбції задовільно описуються моделлю Ленгмюра, що вказує на мономолекулярну адсорбцію іонів  $Cd(II)$  на енергетично однорідних центрах поверхні.

**Ключові слова:** магнетит, нанoadсорбент, адсорбція іонів важких металів, ізотерми адсорбції, моделі ізотерм.

O. M. KAMINSKIY

Ph.D. in Chemistry,  
Associate Professor at the Department of Chemistry  
Zhytomyr Ivan Franko State University  
ORCID: 0000-0003-1971-8437

R. O. DENYSIUK

Ph.D. in Chemistry,  
Associate Professor at the Department of Chemistry  
Zhytomyr Ivan Franko State University  
ORCID: 0000-0003-3077-3795

M. V. CHAYKA

Ph.D. in Chemistry,  
Associate Professor at the Department of Chemistry  
Zhytomyr Ivan Franko State University  
ORCID: 0000-0002-5978-487X

S. V. PYSARENKO

Ph.D. in the Field of Knowledge “Chemical and Bioengineering”,  
Assistant at the Department of Chemistry  
Zhytomyr Ivan Franko State University  
ORCID: 0000-0002-5978-487X

O. S. YEVDCHENKO

Ph.D. in the Field of Knowledge 01 Education/Pedagogy,  
Associate Professor at the Department of Chemistry  
Zhytomyr Ivan Franko State University  
ORCID: 0000-0001-6338-5372

D. YU. PANASIUK

Assistant at the Department of Chemistry  
Zhytomyr Ivan Franko State University  
ORCID: 0009-0005-9490-1823

## ADSORPTION OF WATER FROM $Cd(II)$ IONS WITH MAGNETO-SENSITIVE NANOADSORBENT $Fe_3O_4$ /HYDROXYAPATITE

*In Ukraine, the problem of combating the consequences of natural pollution of the environment, natural water bodies and soils, as well as food products, in particular drinking water, is more acute than ever. Contaminants of military origin (remnants of shells, equipment, weapons, etc.) also pose a potential danger. Extremely harmful pollutants are ions of heavy metals, such as Ferrum, Copper, Manganese, Cadmium and others. The accumulation of such pollutants in the body of living beings leads to various pathologies, the development and strengthening of diseases. One of the reasons for such an impact of heavy metal ions on living organisms is that they are quite difficult to remove from the body, which only exacerbates the problem.*

*In accordance with the EU Directive “Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption”, drinking water, for which the standards for the content of heavy metals have been adopted, is recognized as one of the important food products, in particular cadmium, and other pollutants (dyes, pesticides, herbicides, etc.).*

*In order to study the possibility of adsorption extraction of  $Cd(II)$  ions from aqueous solutions, the synthesis of sol-gel magnetite was carried out by the Elmore co-precipitation method. The synthesized samples were examined by TEM-microscopy methods and it was established that  $Fe_3O_4$  particles are spherical in shape, prone to the formation of aggregates. The size of the crystallites is 3–23 nm. The magnetite surface was modified with hydroxyapatite in order to*

obtain a magnetically sensitive nanoadsorbent for the extraction of Cd(II) ions. With the help of TEM, it was established that there is no influence of magnetite surface modification on the size and morphology of the particles.

A comparative analysis of the adsorption of Cd(II) ions from aqueous solutions by Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/hydroxyapatite surfaces was carried out. It was established that the degree of extraction of more than 60.0% of Cd(II) ions from an aqueous solution in the range of pH = 7.9–8.1 at a temperature of 293 K is achieved in the first 60–90 minutes from the beginning of the adsorbate – adsorbent contact. The adsorption equilibrium at the separation boundary for both surfaces is satisfactorily described by the pseudo-second-order model. It was determined that the adsorption capacity is 21.1 and 22.3 mg/g for Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/hydroxyapatite surfaces, respectively. It is shown that the adsorption isotherms are satisfactorily described by the Langmuir model, which indicates monomolecular adsorption of Cd(II) ions on energetically homogeneous surface centers.

**Key words:** magnetite, nanoadsorbent, adsorption of heavy metal ions, adsorption isotherms, isotherm models.

### Постановка проблеми

Забруднення води токсичними іонами важких металів було визнано серйозною екологічною проблемою в усьому світі. Багато видів діяльності призводять до забруднення водних ресурсів іонами металів, включаючи скидання стічних вод, сільськогосподарські стоки та промислові стоки від гальванопластики, обробки металу, шкіри та електроніки тощо.

Зокрема, наявність іонів Cd(II) у різних природних середовищах негативно впливає на здоров'я як людей, так і тварин. Основними джерелами потрапляння іонів Cd(II) у навколишнє середовище є продукти промислової, сільськогосподарської та побутової діяльності людини. Також можливими джерелами забруднення іонами важких металів, серед яких є Кадмій, є наслідки російської агресії та воєнні дії на території України.

Негативний вплив іонів Cd(II) в основному відбувається через споживання зараженої їжі та води, а також значною мірою через вдихання та куріння цигарок. Кадмій накопичується в рослинах і тваринах з тривалим періодом напіврозпаду близько 25–30 років. Епідеміологічні дані свідчать про те, що вплив іонів Cd(II) може бути пов'язаний з різними видами раку, включаючи рак молочної залози, легенів, простати, носоглотки, підшлункової залози та нирок. Печінка і нирки надзвичайно чутливі до токсичної дії Cd(II). Це може бути пов'язано зі здатністю цих тканин синтезувати металотіонеїни (МТ), які є Cd-індукованими білками, що захищають клітину шляхом міцного зв'язування токсичних іонів Cd(II). Окислювальний стрес, спричинений цим ксенобіотиком, може бути одним із механізмів, відповідальних за декілька захворювань печінки та нирок [1].

Одним із ефективних способів очистки природних водоем від стійких забруднювачів, таких як іони Cd(II), є технологія адсорбційного вилучення, а пошук сучасних екологічно та економічно доцільних адсорбентів залишається актуальною проблемою сьогодення.

Серед адсорбентів, які широко використовуються з метою очистки водоем від іонів важких металів, достойне місце займають магніточутливі наноадсорбенти, які володіють набором унікальних властивостей. Серед таких матеріалів досить поширеними є адсорбенти на основі магнетиту. Перевагою таких наноматеріалів є те, що вони мають добре розвинену поверхню, є доступними, не токсичними та володіють достатніми магнітними характеристиками, що дозволяють безпечно вилучати їх із середовища за допомогою зовнішнього магнітного поля [2–4].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі авторами [5] синтезовано нанорозмірний мезопористий адсорбент на основі магнетиту методом «зеленого» синтезу, використовуючи екстракт біовідходів шкірки солодкого лайму (*Citrus Limetta*). Одержаний наноадсорбент карбонізували за 500 °C і повністю охарактеризували за допомогою різних методів. Методами БЕТ визначено, що питома поверхня магнетитового наноадсорбенту дорівнює 81,28 м<sup>2</sup>/г, а середній діаметр пор знаходився у межах мезопористого діапазону. Магнетитовий наноадсорбент використано для адсорбції іонів Cd(II) з водних розчинів. Встановлено, що процеси адсорбції характеризуються моделлю Ленгмюра, а адсорбційну рівновагу можна описати моделлю псевдо-другого порядку, яка вказує на те, що у процесах адсорбції іонів Cd(II) на поверхні магнетиту домінувала хемосорбція. Встановлено, що адсорбційна ємність становить 48,54 мг/г. Після п'яти циклів десорбції, вилучення Cd(II) становило 72,09%, а елюент 0,01 М HCl десорбував 95,42% Cd(II) з поверхні наноадсорбенту.

Авторами [6] синтезовано магніточутливі нанокомпозити (металоорганічні каркаси) на основі магнетиту, а саме Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZIF-8 та Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@UiO-66-NH<sub>2</sub>. Показано, що синтезовані магнітні наночастинки забезпечують високу ефективність адсорбції Cd(II) і Pb(II) із водних розчинів. Досліджено вплив різних факторів на процеси адсорбції іонів, включаючи значення pH розчину, час адсорбційного контакту, адсорбційну здатність, вплив температури та можливість повторного використання адсорбенту. Показано, що процес адсорбції відповідає кінетичній моделі псевдо-другого порядку та може бути описаним ізотермою Ленгмюра. В основі механізму адсорбції лежить комплексоутворення на поверхні. Крім того, термодинамічні дослідження показали, що процес адсорбції має ендотермічний і спонтанний характер. Встановлено, що протягом шести годин від початку контакту за pH 6,0 величина адсорбційної ємності для Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZIF-8 становить 666,7 мг/г для Pb(II), а для Cd(II) – 370 мг/г відповідно; а для Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@UiO-66-NH<sub>2</sub> адсорбційна ємність становить 833,3 мг/г для Pb(II),

а для Cd(II) – 714,3 мг/г відповідно (маса адсорбента становила 2,5 мг, об'єм розчину 10 мл, початкова концентрація іонів  $C_0 = 10$  мг/л).

Проте, зустрічається недостатньо літературних джерел, що докладно описує процеси адсорбції іонів Cd(II) з водних розчинів поверхню магніточутливого наноадсорбенту Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/гідроксиапатит, що є актуальністю даної роботи.

#### Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є вивчення процесів адсорбції іонів Cd(II) з водних розчинів поверхні немодифікованого магнетиту та нанорозмірного адсорбента Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/гідроксиапатит.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

З метою вивчення адсорбційної активності магніточутливого наноадсорбента Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/гідроксиапатит синтезовано магнетит золь-гель методом Елмора за методикою, описаною в [2].

Отриманий золь магнетиту осаджували в магнітному полі, промивали дистильованою водою. Методами електронної мікроскопії (Трансмісійний електронний мікроскоп (JEOL – 1230), Японія) встановлено, що частинки магнетиту кулястої форми схильні до утворення агрегатів, що характеризуються розмірами 3–23 нм (рис. 1, а). Середній розмір часток залежав від умов синтезу, розподілом за розмірами можна було керувати технологічно. Визначено, що концентрація активних –ОН груп поверхні становила 2,2 ммоль/г за питомої площі поверхні  $S_{\text{шт}} = 90$  м<sup>2</sup>/г.

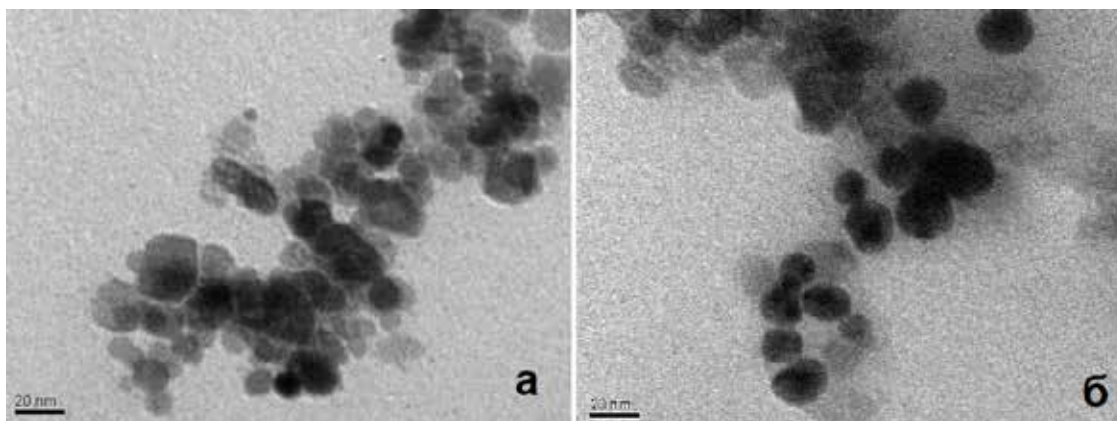
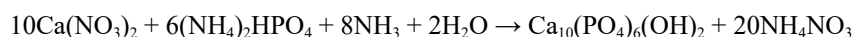


Рис. 1. ТЕМ зображення вихідного Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (а) та наноадсорбенту Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/гідроксиапатит (б)

Для модифікування поверхні магнетиту гідроксиапатитом необхідну кількість вихідних компонентів розраховували таким чином, щоб молярне співвідношення Ca : P знаходилося в межах 1,7 : 1,5 [2, 4]. Процес формування на поверхні магнетиту шару гідроксиапатиту можна показати стехіометрією реакції:



Водні розчини 0,1 М Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O і 0,1 М (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> окремо кожен доводили до pH = 11 водним розчином амоніаку (25%) (pH середовища визначали іонміром I-160M). Наважку магнетиту масою 5 г поміщали в розчин Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> та залишали на 1 годину. Потім поступово додавали розчин (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> та ретельно перемішували суміш скляною паличкою до утворення густого біло-сірого гелю. Далі реакційну суміш періодично перемішували протягом 1 години при нагріванні на електричній плитці до 100 °С, потім залишали на 24 години.

Утворений наноадсорбент Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/гідроксиапатит промивали дистильованою водою до нейтрального pH і відокремлювали за допомогою постійного магніту та висушували у сушильній шафі протягом 8 годин. Одержаний наноконкомпозит містив активні –ОН групи поверхні, концентрація яких становила 2,2 ммоль/г за питомої площі поверхні  $S_{\text{шт}} = 110$  м<sup>2</sup>/г. Методом ТЕМ-мікроскопії показано, що середній розмір частинок наноадсорбенту становив 25–30 нм, а морфологія частинок при цьому не відрізнялася від вихідного магнетиту (Рис. 1, б).

Для вивчення процесів адсорбції іонів Cd(II) з розчинів готували розчини з концентраціями 10–200 мг/л іонів шляхом відважування солі Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O (марки «х.ч.») на аналітичних вагах та доведення потрібної наважки дистильованою водою до мітки у мірній колбі на 250 мл.

Для проведення кінетичних досліджень відважували на електронних вагах по 0,03 г зразків, додавали 5 мл розчину з  $C_0(\text{Cd(II)}) = 200$  мг/л та перемішували на шейкері. Діапазон часу контакту між розчином та адсорбентом становив: 5, 10, 30, 45, 60 та 90 хв. Температура, за якої проводилось дослідження, становила 293К.

Адсорбцію здійснювали у статичному режимі при pH = 7,9–8,1 за кімнатної температури. До 0,03 г адсорбенту додавали 5 мл розчину солі відповідної концентрації і струшували протягом 90 хвилин на шейкері, потім розчин відділяли від адсорбенту за допомогою постійного неодимового магніту.

Адсорбційну ємність ( $A$ ) на поверхні вихідного та модифікованого магнетиту визначали вимірюванням концентрації іонів в розчинах до і після адсорбції із застосуванням атомно-абсорбційного спектрофотометра С – 115 МІ у полум'яній суміші ацетилен-повітря за довжини хвилі аналітичного випромінювання лампи 228,8 нм.

Ємність адсорбентів  $A$  (мг/г) розраховували за формулою:

$$A = \frac{(C_0 - C_p) \cdot V}{m}, \quad (1)$$

де  $C_0$  і  $C_p$  – концентрація вихідного розчину та розчину після адсорбції (мг/л),  $V$  – об'єм розчину (л),  $m$  – наважка адсорбенту (г).

Ступінь вилучення  $R$ , % іонів Кадмію(II) з водних розчинів розраховували за формулою:

$$R = \frac{(C_0 - C_p)}{C_0} \cdot 100\% \quad (2)$$

Для обробки одержаних ізотерм адсорбції іонів Cd(II) з водних розчинів використано математичні моделі адсорбції Ленгмюра, Фрейндліха та Тьомкіна [7–8].

На рис. 2 показано залежність ступеня вилучення іонів Cd(II) з розчину поверхнею чистого магнетиту та нано-адсорбенту Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/гідроксиапатит.

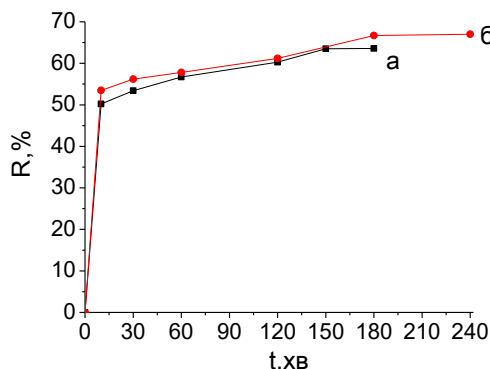


Рис. 2. Залежність ступеня вилучення іонів Cd(II) з розчину поверхнею чистого Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (а) та наноадсорбенту Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/гідроксиапатит (б)

Встановлено, що за перші 60–90 хвилин від початку контакту адсорбат-адсорбент вилучається 67,0% іонів Cd(II) з водного розчину поверхнею Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/гідроксиапатит, тоді як ступінь вилучення іонів Cd(II) для поверхні магнетиту становить 63,4% у діапазоні рН = 7,9–8,1. Адсорбційна рівновага досягається протягом 60 хвилин від початку контакту на межі поділу для обох поверхонь та задовільно описується моделлю псевдо-другого порядку, що вказує на міжчастинкову взаємодію між іонами адсорбату. Лімітуючою стадією в даному випадку є хімічна реакція обміну між частинками на межі поділу «адсорбат-адсорбент».

На рис. 3 зображено ізотерми адсорбції іонів Cd(II) поверхнями чистого Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> та наноадсорбенту Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/гідроксиапатит.

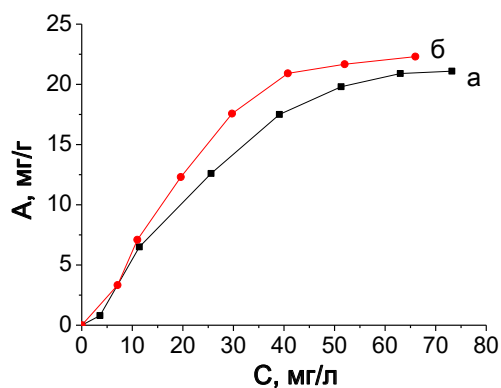


Рис. 3. Ізотерми адсорбції іонів Cd(II) з розчину поверхнею чистого Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (а) та наноадсорбенту Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/гідроксиапатит (б)



Як видно з рис. 3, характер кривих ізотерм адсорбції іонів Cd(II) водних розчинів відносяться до L – типу ізотерм Ленгмюра з виходом на насичення відповідно до класифікації ізотерм за Гільсом. Такий тип ізотерм вказує на те, що міжмолекулярна взаємодія адсорбат – адсорбент переважає над взаємодією адсорбат – адсорбат, що є типовими для мономолекулярної адсорбції. Адсорбційна ємність становить 21,1 та 22,3 мг/г для поверхонь Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> та Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/гідроксиапатит відповідно.

У табл. 1 наведено розрахункові дані у відповідності до математичних моделей ізотерм адсорбції іонів Cd(II) з розчину поверхнями магніточутливих адсорбентів.

Таблиця 1

Розрахункові дані у відповідність до математичних моделей ізотерм адсорбції

Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>		
Модель Ленгмюра		
A <sub>max</sub> , мг/г	K <sub>L</sub> , л/мг	R <sup>2</sup>
21,0±0,4	0,155±0,027	0,997
Модель Фрейндліха		
n	K <sub>F</sub>	R <sup>2</sup>
3,63±0,23	2,248±0,051	0,979
Модель Тьомкіна		
b <sub>T</sub>	K <sub>T</sub>	R <sup>2</sup>
7,230±0,436	0,266±0,056	0,979
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /гідроксиапатит		
Модель Ленгмюра		
A <sub>max</sub> , мг/г	K <sub>L</sub> , л/мг	R <sup>2</sup>
29,0±2,1	0,042±0,004	0,984
Модель Фрейндліха		
n	K <sub>F</sub>	R <sup>2</sup>
1,71±0,11	1,349±0,072	0,978
Модель Тьомкіна		
b <sub>T</sub>	K <sub>T</sub>	R <sup>2</sup>
3,138±0,541	0,206±0,037	0,979

Одержані розрахункові дані дозволяють стверджувати, що адсорбція іонів Cd(II) з розчину обома поверхнями добре описується моделлю ізотерм Ленгмюра, на що вказують коефіцієнти кореляції, які становлять понад 0,98. Це означає, що іони з розчинів адсорбуються на гомогенних енергетично однорідних центрах поверхні, на якій може утворюватись лише мономолекулярний шар адсорбату.

#### Висновки

У роботі проведено синтез магнетиту золь-гель методом Елмора. Методами ТЕМ-мікроскопії встановлено, що частинки Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> кулястої форми та схильні до утворення агрегатів. Розмір кристалітів становив 3–23 нм. Проведено модифікування поверхні магнетиту гідроксиапатитом з метою одержання магніточутливого нанoadсорбента. За допомогою ТЕМ показано, що модифікування поверхні магнетиту не вплинуло на розмір та морфологію частинок.

Проведено адсорбцію іонів Cd(II) з водних розчинів поверхнями Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> та Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/гідроксиапатит. Встановлено, що за перші 60–90 хвилин від початку контакту адсорбат – адсорбент вилучається 67,0% іонів Cd(II) з водного розчину поверхнею Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/гідроксиапатит, тоді як ступінь вилучення іонів Cd(II) для поверхні магнетиту становить 63,4% у діапазоні рН = 7,9–8,1. Адсорбційна рівновага на межі поділу для обох поверхонь задовільно описується моделлю псевдо-другого порядку. Встановлено, що адсорбційна ємність становить 21,1 та 22,3 мг/г для поверхонь Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> та Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/гідроксиапатит відповідно. Показано, що ізотерми адсорбції задовільно описуються моделлю Ленгмюра, що вказує на мономолекулярну адсорбцію іонів Cd(II) на енергетично однорідних центрах поверхні. Показано перспективність використання Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/гідроксиапатит у якості нанoadсорбенту для очистки води від іонів Cd(II).

#### Список використаної літератури

- Genchi G., Sinicropi M. S., Lauria G., Carocci A., Catalano A. The effects of cadmium toxicity. *J. Environ. Res. Public Health*. 2020. Vol. 17, No 11. P. 3782. DOI: 10.3390/ijerph17113782
- Petranovska A. L., Abramov N. V., Turanska S. P., Gorbyk P. P., Kaminskiy A. N., Kussyak N. V. Adsorption of cis dichlorodiammineplatinum by nanostructures based on single-domain magnetite. *J. Nanostruct. Chem.* 2015. Vol. 5, No 3. P. 275-285. DOI: 10.1007/s40097-015-0159-9.

3. Azeez N. R., Salih S. S., Kadhom M., Mohammed H., N., Ghosh T. K. Enhanced termination of zinc and cadmium ions from wastewater employing plain and chitosan-modified mxenes: Synthesis, characterization, and adsorption performance. *Green Chemical Engineering*. 2023. DOI: 10.1016/j.gce.2023.08.003.

4. Камінський О. М., Денисюк Р. О., Чайка М. В., Писаренко С. В., Панасюк Д. Ю. Сорбція йонних форм Цинку(II) з водних розчинів поверхніма магніточутливих нанокмполітів, модифікованих гідроксиапатитом. *Український журнал природничих наук*. 2023. № 5. С. 70-79. DOI: 10.32782/naturaljournal.5.2023.8.

5. Chander S., Yadav S., Rai Sharma H., Gupta A. Sequestration of Cd (II) utilizing biowaste-fabricated recyclable mesoporous magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) nano-adsorbent: Process optimization, thermodynamic investigation, simulation modeling, and feasibility for electroplating effluent. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024. Vol. 986. 174088. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.174088.

6. Abdel-Magied A. F., Abdelhamid H. N., Ashour R. M., Fu L., Dowaidar M., Xia W., Forsberg K. Magnetic metal-organic frameworks for efficient removal of cadmium(II), and lead(II) from aqueous solution. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022. Vol. 10, No 3. 107467. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107467

7. Tripathy S., Raichur A. Abatement of fluoride from water using manganese dioxide-coated activated alumina. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 153, No 3. P. 1043-1051. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.100

8. Onyango M., Kojima Y., Aoyi O., Bernardo E., Matsuda H. Adsorption equilibrium modeling and solution chemistry dependence of fluoride removal from water by trivalent-cation-exchanged zeolite F-9. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 279, No 2. P. 341-350. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.06.038.

#### References

1. Genchi G., Sinicropi M. S., Lauria G., Carocci A., Catalan A. The effects of cadmium toxicity. *J. Environ. Res. Public Health*. 2020. Vol. 17, No 11. P. 3782. DOI: 10.3390/ijerph17113782

2. Petranovska A. L., Abramov N. V., Turanska S. P., Gorbyk P. P., Kaminskiy A. N., Kussyak N. V. Adsorption of cis dichlorodiammineplatinum by nanostructures based on single-domain magnetite. *J. Nanostruct. Chem*. 2015. Vol. 5, No 3. P. 275-285. DOI: 10.1007/s40097-015-0159-9.

3. Azeez N. R., Salih S. S., Kadhom M., Mohammed H., N., Ghosh T. K. Enhanced termination of zinc and cadmium ions from wastewater employing plain and chitosan-modified mxenes: Synthesis, characterization, and adsorption performance. *Green Chemical Engineering*. 2023. DOI: 10.1016/j.gce.2023.08.003.

4. Kaminskyi O. M., Denysiuk R. O., Chaika M. V., Pysarenko S. V., Panasiuk D. Yu. Sorbtsiia yonnykh form Tsynku(II) z vodnykh rozchyniv poverkhniamy mahnitochutlyvykh nanokompozytiv, modyfikovanykh hidroksyapatytom. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychyykh nauk*. 2023. № 5. S.70-79. DOI: 10.32782/naturaljournal.5.2023.8.

5. Chander S., Yadav S., Rai Sharma H., Gupta A. Sequestration of Cd (II) utilizing biowaste-fabricated recyclable mesoporous magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) nano-adsorbent: Process optimization, thermodynamic investigation, simulation modeling, and feasibility for electroplating effluent. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024. Vol. 986. 174088. DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.174088.

6. Abdel-Magied A. F., Abdelhamid H. N., Ashour R. M., Fu L., Dowaidar M., Xia W., Forsberg K. Magnetic metal-organic frameworks for efficient removal of cadmium(II), and lead(II) from aqueous solution. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022. Vol. 10, No 3. 107467. DOI: 10.1016/j.jece.2022.107467

7. Tripathy S., Raichur A. Abatement of fluoride from water using manganese dioxide-coated activated alumina. *Journal of Hazardous Materials*. 2008. Vol. 153, No 3. P. 1043-1051. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.09.100

8. Onyango M., Kojima Y., Aoyi O., Bernardo E., Matsuda H. Adsorption equilibrium modeling and solution chemistry dependence of fluoride removal from water by trivalent-cation-exchanged zeolite F-9. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 279, No 2. P. 341-350. DOI: 10.1016/j.jcis.2004.06.038/

**І. В. КРАВЧУК**

студентка кафедри хімічних технологій, експертизи  
та безпеки харчової продукції  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0009-0003-6038-8545

**Л. В. САЛЄБА**

кандидат технічних наук, доцент,  
завідувач кафедри хімічних технологій, експертизи  
та безпеки харчової продукції  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-8290-4163

**О. Я. СЕМЕШКО**

доктор технічних наук, старший дослідник,  
доцент кафедри хімічних технологій, експертизи  
та безпеки харчової продукції  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-8309-5273

## РОЗРОБКА СКЛАДУ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕМУЛЬСІЇ КОСМЕТИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ КОМПОЗИЦІЙ СИЛІКОНУ ТА СИЛІКОНОВОГО ЕКСТРАКТУ КАЛЕНДУЛИ ЛІКАРСЬКОЇ

У статті представлено результати застосування силікону та силіконового екстракту календули лікарської у складі емульсій косметичного призначення, де силікон полідиметилсилоксан *Silicone Oil 350 cSt* виступатиме як емомент, призначений для пом'якшення шкіри, а силіконовий екстракт – як носій корисних для шкіри людини речовин, вилучених з рослинної сировини. Як екстрагент біологічно-активних речовин був використаний сумішевий силікон амодиметикон *BRB 1288*.

Оптимізація складу емульсії із застосуванням композиції полідиметилсилоксану *Silicone Oil 350 cSt* та рослинного екстракту амодиметикону *BRB 1288* здійснювалась шляхом математичного планування експерименту з використанням застосування симплекс-гранчастого плану Шеффе третього порядку. Розраховано склад емульсії на основі оптимізації математичних моделей залежності динамічної в'язкості та вологості шкіри після нанесення емульсії.

Наведено результати дослідження фізико-хімічних, реологічних та органолептичних властивостей емульсій косметичного призначення, які були створені з використанням композицій силіконових екстрактів календули лікарської з метою отримання косметичних засобів із антиоксидантними властивостями та високими споживними характеристиками.

На основі застосування симплекс-гранчастого плану Шеффе третього порядку оптимізовано склад емульсії з варіюванням вмісту полідиметилсилоксану *Silicone Oil 350 cSt* та рослинного екстракту амодиметикону *BRB 1288* у частці олійної фази.

Дослідження фізико-хімічних та реологічних властивостей розробленої емульсії показало, що вона характеризується колоїдною та термостабільністю, однорідною структурою та характеризується високою в'язкістю та опірністю силам деформації, а також високим ступенем тиксотропного відновлення. Вона має білий злегка жовтуватий колір, майже не має запаху, має легку кремову консистенцію та однорідну структуру. Встановлена висока антиоксидантна здатність розробленої емульсії, досліджена методом *FRAP*. За Скоринг-методом доведено, що розроблена емульсія після нанесення забезпечує підвищення сенсорних показників на шкірі та досягнення пролонгованої вологості шкіри.

**Ключові слова:** емульсії, косметичні силікони, полідиметилсилоксан, амодиметикон, силіконові екстракти, реологічні властивості, антиоксидантна здатність, сенсорні характеристики, Скоринг-метод.

**I. V. KRAVCHUK**

Student at the Department of Chemical Technologies, Expertise  
and Food Safety  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0009-0003-6038-8545

L. V. SALEBA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Head of the Department of Chemical Technologies, Expertise  
and Food Safety

Kherson National Technical University

ORCID: 0000-0002-8290-4163

O. YA. SEMESHKO

Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher,  
Associate Professor, Department of Chemical Technologies,  
Expertise and Food Safety

Kherson National Technical University

ORCID: 0000-0002-8309-5273

## DEVELOPMENT OF THE COMPOSITION AND STUDY OF THE PROPERTIES OF A COSMETIC EMULSION USING COMPOSITIONS OF SILICONE AND SILICONE EXTRACT OF CALENDULA OFFICINALIS

*The article presents the results of using silicone and silicone extract of calendula officinalis in cosmetic emulsions, where polydimethylsiloxane Silicone Oil 350 cSt serves as an emollient for softening the skin, and the silicone extract acts as a carrier of beneficial substances for human skin derived from plant raw materials. The extractant for biologically active substances was a mixed silicone, amodimethicone BRB 1288.*

*The optimization of the emulsion composition using a combination of polydimethylsiloxane Silicone Oil 350 cSt and plant extract of amodimethicone BRB 1288 was carried out through mathematical experimental design using a third-order Scheffé simplex-lattice design. The emulsion composition was calculated based on the optimization of mathematical models for the dynamic viscosity and skin moisture after applying the emulsion.*

*The article presents the results of studies on the physicochemical, rheological, and organoleptic properties of cosmetic emulsions created using compositions of silicone extracts of calendula officinalis, aimed at obtaining cosmetic products with antioxidant properties and high consumer characteristics.*

*Using the third-order Scheffé simplex-lattice design, the emulsion composition was optimized by varying the content of polydimethylsiloxane Silicone Oil 350 cSt and plant extract of amodimethicone BRB 1288 in the oil phase.*

*Studies of the physicochemical and rheological properties of the developed emulsion showed that it is characterized by colloidal and thermal stability, a homogeneous structure, high viscosity, resistance to deformation forces, and a high degree of thixotropic recovery. The emulsion has a white, slightly yellowish color; is nearly odorless, has a light creamy consistency, and a uniform structure. The high antioxidant capacity of the developed emulsion was established using the FRAP method. According to the Scoring method, it was proven that the developed emulsion enhances sensory characteristics on the skin and achieves prolonged skin hydration after application.*

**Key words:** emulsions, cosmetic silicones, polydimethylsiloxane, amodimethicone, silicone extracts, rheological properties, antioxidant capacity, sensory characteristics, Scoring method.

### Постановка проблеми

Сучасні косметичні засоби є класичними колоїдними системами – переважно емульсіями. Останнім часом силікони є постійними інгредієнтами косметичних продуктів, призначених для шкіри. У складах емульсійних кремів їх застосовують переважно у якості емоментів з метою забезпечення пом'якшення шкіри людини протягом тривалого часу. Крім того, на сьогоднішній день актуальним є введення в склад косметичних продуктів різноманітних біологічно активних речовин для різних цілей, зокрема рослинного походження. Так у складі рослин міститься велика кількість біологічно активних речовин, таких як алкалоїди, сапоніни, глікозиди, флаваноїди, вітаміни, дубильні речовини, фосфоліпіди, воски, тощо, які вилучають з рослин за допомогою екстракції. Саме ці речовини в складі косметичних продуктів впливають на шкіру специфічно, виконуючи захисну, зволожуючу, регенеруючу, живильну дію тощо.

Враховуючи вищевикладене, застосування силіконів для екстракції біологічно активних речовин рослин та наступне застосування отриманих екстрактів може забезпечити отримання багатофункціональних косметичних продуктів. Силіконовий екстракт у цьому випадку буде виступати як емомент, призначений для пом'якшення шкіри, та як носій корисних для шкіри людини речовин, вилучених з рослинної сировини.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Косметичні емульсії є одним з найбільш розповсюджених видів косметичної продукції і на сьогоднішній день відбувається постійна розробка нових композицій із заданими споживними властивостями. Особлива увага приділяється створення косметичних емульсій, які матимуть спеціальні властивості, зокрема антиоксидантні, та будуть збагачені біологічно активними речовинами.

Оскільки на сьогодні силікони присутні у більшості косметичних емульсійних засобах для шкіри, то їх застосування крім прямого призначення ще як носіїв функціональних речовин рослинного походження є інноваційним підходом щодо створення косметичних продуктів. У дисертаційному дослідженні [1] було розроблено та вивчено властивості складів косметичних емульсій із застосуванням кремнійвмісних речовин як емоментів та як носіїв біологічно активних речовин, екстрагованих ними із рослинної сировини полину гіркого та квіток календули. Було отримано силіконові рослинні екстракти та емульсійні системи на їх основі із застосуванням індивідуальних силіконів. При цьому емульсії косметичного призначення характеризувались термо- та колоїдною стабільністю, високими показниками пружно-в'язкісних і сенсорних властивостей та антиоксидантної активності. При цьому встановлено, що оптимальні пружно-в'язкісні властивості утворених систем забезпечують індивідуальний силікон Silicone Oil 350 cSt та сумішевий силікон BRB 1834, який є розчином диметиконолу в циклопентасилоксані, а сенсорні показники шкіри – наступні сумішеві силікони: амінодиметикон BRB 1288, ПЕГ-12 полідиметилсилоксан BRB 526 та розчин диметиконолу в циклопентасилоксані BRB 1834. Визначення показників антиоксидантної активності отриманих силіконових рослинних екстрактів показало, що найефективнішими екстрагентами біологічно активних речовин є наступні сумішеві поліорганосилоксани: амінодиметикон BRB 1288, ПЕГ-12 полідиметилсилоксан BRB 526 та розчин диметиконолу в циклопентасилоксані BRB 1834. Отже, серед переліку досліджуваних силіконів було встановлено речовини, які забезпечують необхідні високі показники реологічних і сенсорних характеристик у емульсіях та які є ефективними екстрагентами біологічно активних речовин із рослинної сировини.

Однак слід зазначити, що у роботі [1] було вивчено властивості косметичних емульсій із застосуванням індивідуальних силіконів або їх рослинних екстрактів. Тому, актуальним є продовження здійснених досліджень у напрямі розробки складу косметичної емульсії із застосуванням композиції силіконів та рослинних силіконових екстрактів.

Введення отриманих із рослин природних антиоксидантів у косметичні склади також є одним із перспективних напрямків останніх досліджень у дерматології та косметичі.

Календула лікарська або нагідки (*Caléndula officinális L.*), яка належить до родини Астрових *Asteraceae*, цвіте з червня до пізньої осені і на сьогодні входить до десятки лікарських рослин, що найбільш обробляються в різних країнах Європи [2, 3].

Патрі Ф., Сілано В. і Д'Амеліо Ф.С. [4, 5] перерахували наступні складові календули лікарської: каротиноїди, включаючи каротини, флавохром, мутаохром, ауохром, флавоксантин, хірсантемоксантин, ксантофіл і лікопени; флавоноїди, включаючи ізорафнетин глюкозид, кверцетин глюкозид і кверцетин; тритерпенові спирти (монооли), включаючи  $\alpha$ -амірин,  $\beta$ -амірин, таракастерин і лулеол; тритерпенові спирти (діоли), включаючи фарадіол, арнідіол, брейл, еритродіол, календуладіол та урсадіол; тритерпенові спирти (триоли), включаючи лонгіспіногенін, люпенетріол, урсатріол, геліантріол С і хіліантріол F; слизи; сапоніни (одна специфікація містить сапоніни не менше 2%, в розрахунку на олеанову кислоту); смоли; токофероли; поліпренілхінони.

Екстракт календули демонструє антиоксидантну, протизапальну, знеболюючу, антибактеріальну та противірусну дію [6]. Повідомлялося також, що він проявляє активність щодо пригнічення пухлин, а також захисну дію від розвитку раку та несприятливих ефектів променевої хвороби та хіміотерапії [7].

Календула лікарська широко використовується в косметичі та дерматології для лікування шкіри завдяки вмісту в її екстрактах терпеноїдів, каротиноїдів, флавоноїдів та легких олій [8]. Календулу лікарську використовують у дерматокосметичі завдяки її тонізуючій, антисептичній та протиподразнюючій дії, для загоєння ран і шкірних висипань, [9] деякі екстракти календули лікарської застосовують зовнішньо для лікування виразок шкіри, екземи та кон'юнктивіту [7], а також для видалення пігментних плям на шкірі [10].

У косметичних продуктах календула використовується в рецептурах для чутливої шкіри та заспокійливих продуктах (наприклад, після дії сонця) різного призначення, включаючи засоби для шкіри обличчя і тіла, очей, волосся, з визнаною безпекою для використання в косметичі [11]. Так у Європейському довіднику косметичних інгредієнтів існує 14 позначень INCI для препаратів *Caléndula officinális L.*, і в рамках одного позначення можна знайти препарати з різним складом, залежно від частини рослини та методу вилучення [12]. Найчастіше в косметичних продуктах використовується екстракт квіток календули [11].

Календула лікарська є частиною багатой та різноманітної української флори, у народі вона називається нагідки і використовується в традиційній народній медицині [13, 14]. Кліматичні умови України дозволяють вирощувати календулу в достатній кількості, щоб забезпечити постійне виробництво продуктів на її основі. Саме завдяки цінному складу, а також доступності, широкій поширеності в нашій країні, календулу було обрано для збагачення емульсії косметичного призначення. Це забезпечить розширення асортименту косметичної продукції за рахунок отримання засобу із цілющими властивостями.

#### Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є оптимізація складу косметичної емульсії із застосуванням композиції силікону і рослинного силіконового екстракту та дослідження фізико-хімічних, реологічних, органолептичних властивостей розробленої емульсії.

## Викладення основного матеріалу дослідження

Як рослинну сировину було використано сухі квітки календули лікарської з вмістом вологи 14% виробництва ПРАТ «Ліктрави» [15]. Для екстрагування біологічно активних речовин із квіток календули було застосовано амодиметикон BRB 1288, оскільки у роботі [1] визначено його ефективність при вилученні вітамінів, зокрема вітаміну С, флавоноїдів, дубильних та екстрактивних речовин, глікозидів тощо.

Амодиметикон BRB 1288 – це сумішевий силікон який містить за INCI Aminoethylaminopropylsiloxane (рис. 1а), Trideceth-12 (рис. 1б), Cetrimonium Chloride (рис. 1в).

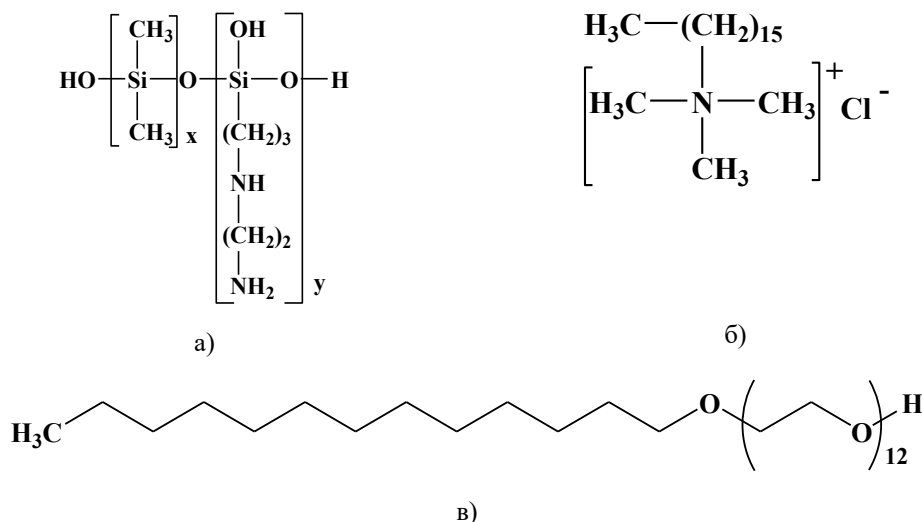


Рис. 1. Хімічна будова складових BRB 1288: а) Aminoethylaminopropylsiloxane; б) Trideceth-12; в) Cetrimonium Chloride

BRB 1288 – це 35%-ова катіонна емульсія силіконового полімеру аміноетиламінопропілсиліоксану. Крім того у силіконі BRB 1288 міститься близько 5% 2-феноксиганолу. BRB 1288 представляє собою білу рідину, розчинну у воді і не розчинну в органічних розчинниках, з властивостями ПАР та температурою кипіння близько 100°C.

Під час екстракції співвідношення сировини та екстрагенту складало 1:20, відповідно. Підготовлену подрібнену до розмірів часток 3-5 мм рослинну сировину зважували, поміщали у термостійку ємність з притертою кришкою, заливали розрахованою кількістю силікону і перемішували. Отриману суміш закупорювали і поміщали у термостат на 24 год. при температурі 40-42°C. У ході екстракції масу періодично перемішували. Після закінчення процесу екстракції витяжку відокремлювали від шроту шляхом фільтрації [16].

За даними [1] отриманий екстракт характеризується наявністю вітамінів (B<sub>1</sub>, B<sub>5</sub>, PP, P, C, A, E), флавоноїдів, дубильних та екстрактивних речовин, терпеноїдів. Отриманий рослинний силіконовий екстракт було застосовано для розробки складу емульсії косметичного призначення у композиції з полідиметилсиліоксаном Silicone Oil 350 cSt.

Також у складі емульсії було використано полідиметилсиліоксан Silicone Oil 350 cSt – INCI: polydimethylsiloxane 350 (рис. 2) виробництва «BRB International BV», Нідерланди, представляє собою в'язку рідину без кольору і запаху, не розчинну у воді, розчинну в органічних розчинниках, з температурою кипіння 250°C.

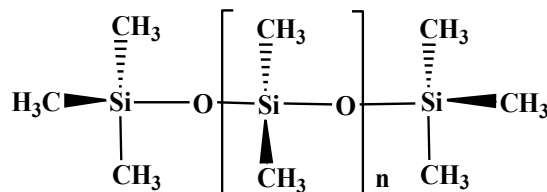


Рис. 2. Хімічна будова полідиметилсиліоксану Silicone Oil 350 cSt

У роботі за основу було використано склад базової малокомпонентної інертної емульсії наступного складу, %: олійна фаза (мінеральна олія) – 25,00; емульгатор Eumulgin Prisma (BASF) – 0,35; співемульгатор цетеарилловий спирт (S.F.I.C.) – 4,00; водна фаза (дистильована вода) – до 100,00 [17].

Слід зазначити, що у роботі було оптимізовано склад емульсії з варіюванням вмісту силікону та силіконового рослинного екстракту у частці олійної фази, яка була незмінна і складала 25%.

Під час приготування емульсій гідрофобні речовини (мінеральна олія, силікон, силіконовий рослинний екстракт, емульгатор, співемульгатор) розплавляли у термостійкій ємності на водяній бані при температурі 50°C до повного розчинення твердих компонентів. Паралельно у другій ємності нагрівали на водяній бані необхідний об'єм води до температури 50°C. В ємність з олійною фазою поміщали механічну мішалку якірного типу і в процесі перемішування поступово невеликими порціями додавали гарячу воду. Тривалість емульгування складала 30 с.

Отже, на наступному етапі роботи було здійснено математичне планування експерименту для розробки складу косметичної емульсії із застосуванням композиції силікону та рослинного силіконового екстракту.

З метою оптимізації рецептур емульсій косметичного призначення відоме застосування математичного планування експерименту із застосуванням моделей «склад – властивість» на основі симплекс-градчастих планів Шеффе Г. [18]. Їх використання дозволяє скоротити об'єм експерименту та отримати математичні залежності, що описують залежність властивостей композиції від її складу.

При вивченні властивостей композиційних складів, що залежать тільки від співвідношень компонентів, факторний простір являє собою правильний (q-1)-мірний симплекс. Експериментальні точки представляють {q, n}-решітки на симплексі, де n – ступінь полінома.

Так як у роботі розробляється композиція, в якій буде варіюватись три компоненти (q=3), а саме: вміст силікону полідиметилсилоксан Silicone Oil 350 cSt, рослинного екстракту амодиметикону BRB 1288 та мінеральної олії – то правильний симплекс представлятиме рівносторонній трикутник.

Для опису залежності властивостей композицій косметичного призначення від її складу було обрано приведення поліном третього порядку, який для трьохкомпонентної суміші має вигляд:

$$\hat{y} = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \gamma_{12} x_1 x_2 (x_1 - x_2) + \gamma_{13} x_1 x_3 (x_1 - x_3) + \gamma_{23} x_2 x_3 (x_2 - x_3) + \beta_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (1)$$

Наведемо розрахунок складу композиції косметичного призначення, в якій буде варіюватись три компоненти жирової фази, загальна частка яких постійна і дорівнює 25%: полідиметилсилоксан Silicone Oil 350 cSt, рослинний екстракт амодиметикону BRB 1288 та мінеральна олія. Крім того, склад міститиме воду, емульгатор Eumulgin Prisma, співемульгатор цетеариловий спирт, концентрація яких не варіювалась.

Дослідження проводили на локальній області факторного простору, яка була обмежена зверху і знизу межами концентрацій обраних речовин (у частках одиниці):

$$\begin{aligned} 0 &\leq x_1 \text{ (полідиметилсилоксан Silicone Oil 350 cSt)} \leq 0,07; \\ 0 &\leq x_2 \text{ (рослинний екстракт амодиметикону BRB 1288)} \leq 0,07; \\ 0,93 &\leq x_3 \text{ (мінеральна олія)} \leq 1. \end{aligned} \quad (2)$$

Спочатку було зроблено перехід від компонентів  $x_i$  до псевдокомпонентів  $z_i$ .

Властивості складу композиції оцінювали згідно ряду параметрів оптимізації  $Y_i$ :

– динамічна в'язкість, визначена при швидкості зсуву  $9 \text{ c}^{-1}$ ,  $\eta$ , Па·с [19];

– вологість шкіри після нанесення косметичної композиції, W, %.

Кожен дослід був повторений двічі. Результати дослідження у вигляді середніх значень параметрів оптимізації представлені в табл. 1.

Таблиця 1

**Значення параметрів оптимізації відповідно до симплекс-градчастого плану Шеффе третього порядку для трьохкомпонентного складу**

Номер дослід	$\eta$ , Па·с	W, %
$y_1$	2,22	41
$y_2$	1,58	39
$y_3$	1,33	46
$y_{112}$	1,84	50
$y_{122}$	2,60	42
$y_{223}$	2,03	48
$y_{233}$	2,53	38
$y_{113}$	1,90	56
$y_{133}$	1,96	42
$y_{123}$	2,85	52

Після розрахунків коефіцієнтів рівняння 2 [18], отримані моделі (3), (4) залежностей від складу композиції:

– динамічної в'язкості при швидкості зсуву  $9 \text{ c}^{-1}$ :

$$\eta = 2,21z_1 + 1,58z_2 + 1,33z_3 + 1,43z_1z_2 + 2,45z_1z_3 + 3,71z_2z_3 - 6,59z_1z_2(z_1 - z_2) - 2,45z_1z_3(z_1 - z_3) - 3,94z_2z_3(z_2 - z_3) + 13,43z_1z_2z_3. \quad (3)$$

– вологості шкіри після нанесення косметичної композиції, W, %:

$$W = 41z_1 + 39,5z_2 + 45,5z_3 + 27z_1z_2 + 24,8z_1z_3 + 3,4z_2z_3 + 47,3z_1z_2(z_1 - z_2) + 101,3z_1z_3(z_1 - z_3) + 77,6z_2z_3(z_2 - z_3) + 104,6z_1z_2z_3. \quad (4)$$

Перевірка адекватності отриманих моделей шляхом проведення експерименту у додатковій контрольній точці та порівняння розрахованих величин  $t$  з критерієм Стьюдента показало, що математичні моделі 3, 4, які описують залежність динамічної в'язкості та вологості шкіри після нанесення косметичної композиції від її складу є адекватними. Дані математичні моделі дозволяють всебічно досліджувати об'єкт, що вивчається або процес, а саме: проводити інтерполяцію або екстраполяцію даних, тобто прогнозувати результати, проводити ранжування факторів за ступенем їх впливу, здійснювати оптимізацію – знаходити найкращі варіанти з точки зору поставлених цілей. У більшості випадків математичні моделі використовують для оптимізації [18].

Далі було визначено оптимальний склад композиції при максимальних значеннях динамічної в'язкості та вологості шкіри після її нанесення шляхом оптимізації системи отриманих математичних моделей. Встановлено, що максимальні показники в'язкості системи та вологості шкіри після нанесення косметичного складу спостерігаються при наступному складі компонентів у косметичній композиції (у частках одиниці): полідиметилсилоксан Silicone Oil 350 cSt – 0,03–0,06; рослинний екстракт амодиметикону BRB 1288 – 0,03–0,05; мінеральна олія – 0,89–0,94.

Якщо взяти середні значення концентрацій компонентів у визначених діапазонах, то їх значення у %, виходячи із умови, що вся частка композиції складає 25% становитиме (у %):

- полідиметилсилоксан Silicone Oil 350 cSt – 1,25%;
- рослинний екстракт амодиметикону BRB 1288 – 1,00%;
- мінеральна олія – 22,7%.

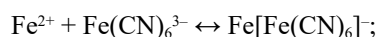
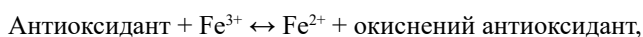
У результаті оптимізації моделей «склад-властивість», встановлено наступний склад косметичної емульсії на основі композиції силіконів, %: **мінеральна олія – 22,75; полідиметилсилоксан Silicone Oil 350 cSt – 1,25; рослинний екстракт амодиметикону BRB 1288 – 1,00;** емульгатор Eumulgin Prisma – 0,35; співемульгатор цетеариловий спирт – 4,00; вода – 70,65.

Наведений склад косметичної композиції на основі полідиметилсилоксану Silicone Oil 350 cSt та рослинного екстракту амодиметикону BRB 1288 забезпечує максимальні показники в'язкості системи та вологості шкіри після нанесення косметичного складу.

Далі у роботі було досліджено властивості косметичної емульсії розробленого складу. Отримана емульсія має білий, злегка жовтуватий колір, майже не має запаху та має легку кремову консистенцію і однорідну структуру. Було встановлено, що досліджувана емульсія є термо- та колоїдною стабільністю та має  $\text{pH} \approx 6,9$ .

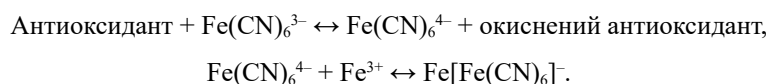
З метою оцінки антиоксидантних властивостей розробленої емульсії косметичного призначення із використанням силікону та силіконового екстракту квіток календули було визначено її антиоксидантну здатність емульсії відновлення заліза методом FRAP (Ferric reducing antioxidant power), який є типовим і заснований на відновленні комплексу трьохвалентного заліза  $\text{Fe}^{3+}$  з лігандою до комплексу двохвалентного заліза  $\text{Fe}^{2+}$ , забарвленого у яскраво-синій колір, під дією антиоксидантів у кислому середовищі. Антиоксидантна активність визначається як збільшення поглинання при 700 нм, а результати виражаються в мікромолярних еквівалентах  $\text{Fe}^{2+}$  або відносно стандарту антиоксиданту [20]. На відміну від інших методів, заснованих на переносі електронів, аналіз FRAP проводиться у кислому середовищі при  $\text{pH} 3,6$  для підтримання розчинності заліза і, що більш важливо, для керування переносом електронів. Це збільшує окисно-відновний потенціал та сприяє проходженню реакції за домінуючим механізмом [21].

У вихідному аналізі FRAP використовується трипіридилтриазин у якості джерела ліганд, що зв'язують залізо. У той час для оцінки відновлювальної здатності аскорбінової кислоти також відоме використання альтернативних ліганд для зв'язування заліза, таких як феррозин [22]. Нещодавно ферриціанід калію став найбільш популярним реагентом на основі заліза, який використовується в аналізах FRAP. При цьому берлінська лазур, отримана як кінцевий продукт, кількісно визначається спектрофотометричним методом і вказує на відновну здатність досліджуваних антиоксидантів. Отримання берлінської лазури може здійснюватися двома різними способами. Антиоксиданти можуть або відновлювати іони  $\text{Fe}^{3+}$  у розчині до іонів  $\text{Fe}^{2+}$ , які зв'язують ферриціанід з утворенням берлінської лазури, або відновлює ферриціанід до ферроціаніду, який зв'язує вільні іони  $\text{Fe}^{3+}$  у розчині та утворює берлінську лазур. Спрощена схема цих двох реакцій наведена нижче [23].





або



Одним із недоліків аналізу FRAP із застосуванням ферриціаніду калію є схильність берлінської лазурі випадати в осад з утворенням суспензії та зафарбовуванням вимірювальної кювети. Тому час для додавання  $\text{Fe}^{3+}$  ( $\text{FeCl}_3$ ) є важливим і може внести помилку в інтерпретацію результатів. Щоб стабілізувати берлінську лазур та попередити випадіння осаду Беркер К.І. [23] запропонував додавання ПАР, а саме додецилсульфату натрію, з одночасним регулюванням значення рН близько 1,7 для підтримання окисно-відновної активності іонів  $\text{Fe}^{3+}$  без гідролізу. Автор припускає, що ця модифікація також дозволяє оцінювати антиоксиданти, окисно-відновний потенціал яких не перевищує окисно-відновний потенціал  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  при звичайному аналізі FRAP, тобто двовалентний реагент заліза слабкий для окиснення антиоксидантів, таких як фізіологічні неферментативні антиоксиданти тіолового типу.

Пулідо Р., Браво Л., Саура-Каліксто Ф. [24] повідомили, що результати визначення FRAP можуть змінюватися залежно від часу аналізу, спостерігаючи реакцію між антиоксидантами та  $\text{Fe}^{3+}$ , яка змінюється від кількох хвилин до кількох годин. Таким чином, кінцева точка поглинання в одній точці може не являти собою повну реакцію, оскільки різні антиоксиданти потребують різного часу реакції для виявлення [25].

Антиоксидантну здатність досліджуваних емульсій оцінювали за методом Оуайзу М. шляхом визначення здатності відновлення іонів  $\text{Fe}^{3+}$  [26]. Для цього 0,2 г зразка емульсії змішували з фосфатним буфером (2,5 мл; 0,2 М; рН 6,6) і ферриціанідом калію  $[\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6]$  (2,5 мл; 1%-вого розчину). Отриману суміш витримували при 50°C протягом 20 хв., потім до суміші додавали 2,5 мл 30%-вого розчину трихлороцтової кислоти і фільтрували. До 0,5 мл отриманого фільтрату додавали  $\text{FeCl}_3$  (0,5 мл, 0,1%-вого розчину). Показник оптичної густини визначали на спектрофотометрі ULAB 102 при довжині хвилі 700 нм. Для порівняння використовували 20%-вий розчин аскорбінової кислоти.

Отримані результати наведені на рис. 3. Для порівняння також було визначено досліджуваний показник для базової емульсії, отриманого силіконового рослинного екстракту та 20%-ого розчину аскорбінової кислоти.

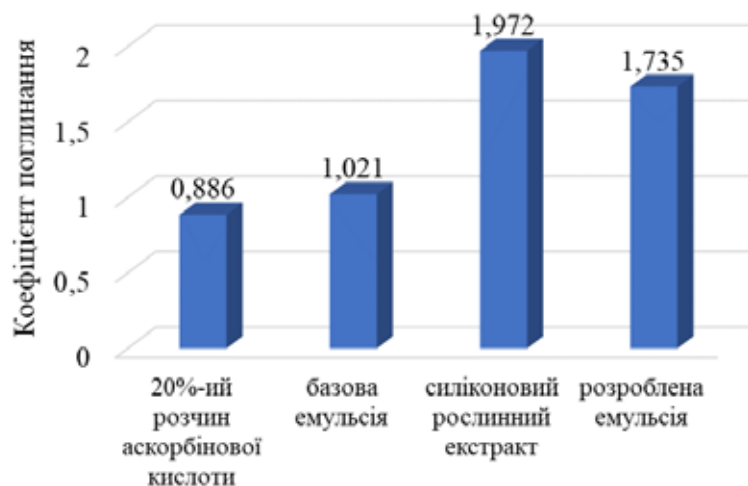


Рис. 3. Антиоксидантна здатність досліджуваних речовин.

Отримані результати дослідження (рис. 3) показують, що найнижчою антиоксидантною активністю володіє 20%-ий розчин аскорбінової кислоти та базова емульсія. Найвищими антиоксидантними властивостями серед досліджуваних речовин характеризується рослинний екстракт амодиметикону BRB 1288. Розроблена емульсія з використанням композиції силікону та силіконового рослинного екстракту має високу антиоксидантну активність, враховуючи те, що рослинного екстракту амодиметикону BRB 1288 в ній міститься лише 1%. Слід зазначити, що антиоксидантна здатність розробленої емульсії перевищує цей показник для 20%-ого розчину аскорбінової кислоти у 2 рази, а для базової емульсії – у 1,7 рази.

Шкіра є зовнішнім бар'єром тіла і схильна до впливу різних екзогенних джерел окисного стресу, включаючи ультрафіолетове випромінювання та забруднюючі речовини. У відповідь ці окислювальні атаки у шкірі утворюються активні форми кисню та інші вільні радикали [27].

Шкіра захищена від шкідливого впливу вільних радикалів завдяки наявності ендогенної антиоксидантної мережі, що складається з безлічі ліпофільних (наприклад, вітамін Е, убіхінони, каротиноїди) та гідрофільних

(наприклад, вітамін С, сечова кислота та глутатіон) речовин, які відповідають за баланс між прооксидантами та антиоксидантами. В якості першого бар'єру активні форми кисню відновлюються антиоксидантними ферментами, такими як супероксид дисмутаза, каталаза та глутатіон пероксидаза, а також ендогенними та екзогенними невеликими молекулами, такими як глутатіон та вітаміни С та Е [28]. Коли біомолекули окиснюються, вони відновлюються або замінюються системами біологічного захисту. Тим не менш, біомолекули поступово незворотно окиснюються і їх накопичення з часом змінює біологічні функції, що в кінцевому підсумку призводить до старіння та вікових захворювань [29].

Порушення балансу між окисниками та антиоксидантами через підвищену дію екзогенних джерел активних форм кисню було визначено як «окисний стрес» та включає окисне пошкодження ліпідів, білків та ДНК. Місцеве введення антиоксидантів вважається цікавою стратегією зменшення пошкодження шкіри, викликаного реактивними формами кисню, оскільки воно може поліпшити антиоксидантний статус шкіри [28]. Тому на основі проведених досліджень можна стверджувати, що розроблена емульсія, яка характеризується високим рівнем антиоксидантної активності, є перспективною основою для виробництва косметичних засобів із захисними по відношенню до шкіри властивостями.

Далі були вивчені реологічні характеристики емульсії, які є важливими для вирішення як практичних та інженерних завдань а саме вибору оптимальних виробничих режимів, проектування обладнання та поточних ліній. Вказаними характеристиками керуються під час проведення технологічних процесів гомогенізації, вальцювання, транспортування по трубопроводах, фасування. Реологічні властивості косметичних емульсій дозволяють прогнозувати їх здатність видавлювання із туб, намазування на шкіру. Крім того, реологічні характеристики служать для об'єктивного контролю якості на етапах створення, виробництва, зберігання та застосування як сировини, так і готової косметичної продукції [30–32].

Визначення реологічних властивостей розробленої емульсії та для порівняння базової емульсії без додавання силіконів проводили на ротаційному віскозиметрі «Rheotest-2» шляхом визначення залежності в'язкості і прикладеної напруги зсуву від швидкості зсуву та розрахунку ступеня тиксотропії зразків емульсій [33]. Отримані результати визначення в'язкості емульсій від швидкості зсуву наведено на рис. 4.

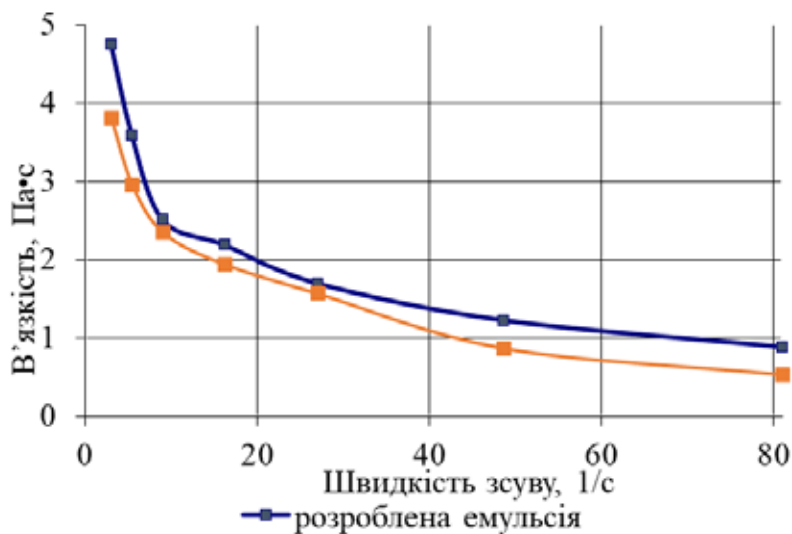


Рис. 4. Залежність в'язкості емульсії від швидкості зсуву

Аналіз результатів, наведених на рис. 4, дозволяє стверджувати, що додавання у склад емульсії композиції силіконів сприяє зростанню показників в'язкості отриманої емульсії у всьому досліджуваному діапазоні швидкості зсуву.

Далі серед реологічних характеристик досліджено залежність прикладеної напруги зсуву  $\tau$  від швидкості зсуву, яку називають мірою опору рідини до потоку [34, 35]. Прикладена напруга зсуву  $\tau$  характеризує опір досліджуваної системи до дії прикладеної сили деформації. Результати дослідження прикладеної напруги зсуву від швидкості зсуву досліджуваних емульсій представлено на рис. 5.

У результаті аналізу даних рис. 5 можна стверджувати, що введення до складу емульсії композиції силіконів сприяє зростанню напруги зсуву та посилює опір системи до деформації. При збільшенні швидкості зсуву зазначена залежність зберігається. Отже, можна зробити висновок, що введення силіконів стимулює опірність емульсійної системи силам деформації порівняно з базовою емульсією.

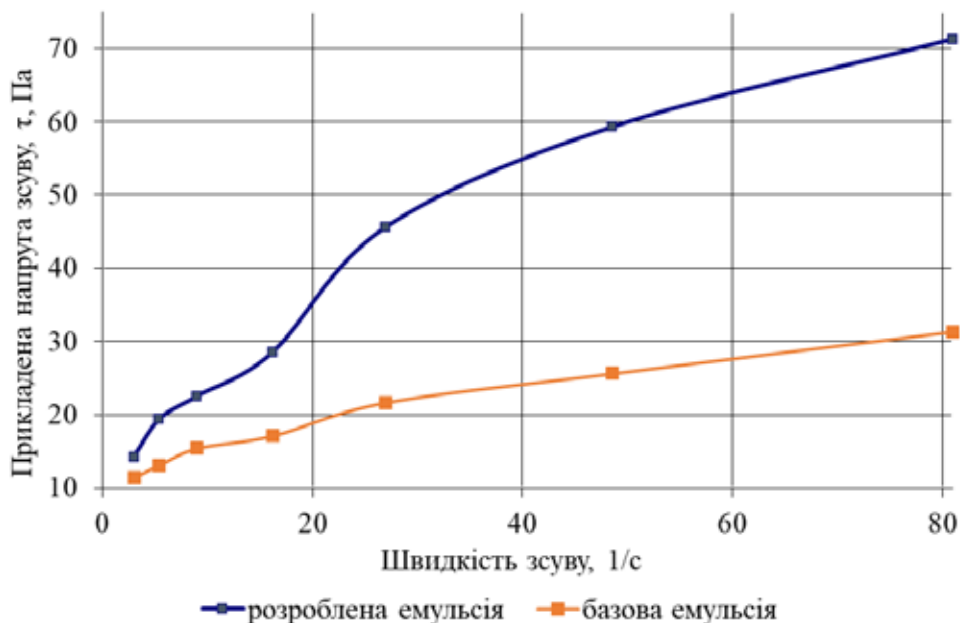


Рис. 5. Залежність прикладеної напруги зсуву емульсій від швидкості зсуву

Грунтуючись на характеристиках в'язкості емульсій та напруги зсуву визначається показник тиксотропії або релаксації системи, який характеризує її здатність відновлюватися до початкового стану після зняття зовнішніх сил деформації та який повинен намагатися досягти 100%. Розрахунок ступеня тиксотропії досліджуваних емульсійних систем проводили на основі отриманих даних залежності в'язкості досліджуваних емульсій від градієнта швидкості зсуву. Результати розрахунків тиксотропного відновлення емульсійних систем у табл. 2.

Таблиця 2

Ступінь тиксотропного відновлення в'язкості косметичних емульсій

Показник	Емульсія	
	базова	розроблена
Ступінь тиксотропного відновлення в'язкості, %	57,2	84,6

Результати, наведені у табл. 2, засвідчують, що у порівнянні з показником базової емульсії (57,2%) додавання композиції силіконів сприяє підвищенню ступеня тиксотропного відновлення емульсійної системи після зняття зовнішніх сил деформацій. При цьому досліджуваний показник значно зростає та складає 84,6%.

Одними з важливих властивостей косметичних емульсій є відчуття людини після їх нанесення і без сенсорних відчуттів неможливо повноцінно оцінити засіб косметичного призначення. У роботі сенсорні властивості досліджуваних емульсій були визначені Скоринг-методом. Обрані сенсорні показники 5 респондентів оцінювали органолептично після нанесення зразків емульсій на шкіру у балах від 1 до 10, де 10 балів відповідають найкращій характеристиці [36]. Для сенсорної оцінки обрані наступні показники: розтікання, поглинання шкірою, м'якість, матовість та відчуття догляду [36, 37]. Результати дослідження наведено на рис. 6.

Дані, наведені на рис. 6, свідчать про те, що введення до складу емульсії композиції силіконів позитивно впливає на сенсорні характеристики шкіри після нанесення. Усі досліджувані показники відчуттів після нанесення розробленої емульсії збільшуються, що свідчить про її високі споживні властивості.

Також у роботі було визначено вологість шкіри після нанесення зразків косметичних емульсій за допомогою комбінованого високочутливого тестеру «Skin Analyzer» одразу після нанесення емульсій та через 1 і 2 год. Відомо, що оптимальна вологість шкіри нормального типу у осінній період є 30–50% [38–40]. Отримані результати показані на рис. 7.



Рис. 6. Вплив композиції силіконів на сенсорні показники емульсій



Рис. 7. Вплив композиції силіконів на вологість шкіри

Наведені результати на рис. 7 свідчать, що одразу після нанесення розроблена та базова емульсії забезпечили досягнення оптимальних значень вологості шкіри, які зменшуються з часом. Однак слід зазначити, що вологість шкіри після нанесення базової емульсії не тривала, швидко зменшується і навіть стає меншою за початкову. Розроблена косметична емульсія з додаванням силіконів сприяє збереженню високих показників вологості шкіри протягом тривалого часу.

### Висновки

На основі застосування симплекс-гратчастого плану Шеффе третього порядку здійснено математичне планування експерименту щодо оптимізації складу емульсії із застосуванням композиції полідиметилсилоксану Silicone Oil 350 cSt та рослинного екстракту амодиметикону BRB 1288. У результаті оптимізації математичних моделей залежності динамічної в'язкості та вологості шкіри після нанесення емульсії знайдено її склад, який забезпечує досягнення найвищих показників досліджуваних характеристик, (%): мінеральна олія – 22,75; полідиметилсилоксан Silicone Oil 350 cSt – 1,25; рослинний екстракт амодиметикону BRB 1288 – 1,00; емульгатор Eumulgin Prisma – 0,35; співемульгатор цетеариловий спирт – 4,00; вода – 70,65.

Встановлено, що розроблена емульсія характеризується колоїдною та термостабільністю, однорідною структурою та показником рН 6,9, а також має білий злегка жовтуватий колір, майже не має запаху, має легку кремову консистенцію та однорідну структуру, характеризується високою в'язкістю та опірністю силам деформації, а також високим ступенем тиксотропного відновлення.

Методом FRAP досліджено антиоксидантну здатність розробленої емульсії та встановлено, що антиоксидантна здатність розробленої емульсії перевищує цей показник для 20%-ого розчину аскорбінової кислоти у 2 рази, а для базової емульсії – у 1,7 рази.

Вивчення за Скоринг-методом сенсорних відчуттів на шкірі після нанесення розробленої емульсії, а саме: розтікання, поглинання шкірою, м'якість, матовість та відчуття догляду – показало підвищення вказаних показників у порівнянні із базовою емульсією. Встановлено, що нанесення розробленої емульсії на шкіру забезпечує досягнення пролонгованої вологості шкіри.

### Список використаної літератури

1. Гаргаун Р.В. Розробка технології застосування поліорганосилоксанів як екстрагентів біологічно активних речовин для емульсій косметичного призначення: дис. ... д-ра. філософії: 161. Херсон, 2021. 212 с. URL: <https://kntu.net.ua/ukr/content/download/88022/507269/file/%D0%94%D0%B8%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F%20%D0%93%D0%B0%D1%80%D0%B3%D0%B0%D1%83%D0%BD%20%D0%A0.%D0%92.%20161.pdf> (дата звернення 15.05.2024).
2. Лікарські рослини: чи варто братися за цю нішу в Україні і чи можна заробити? URL: <https://superagronom.com/articles/668-likarski-roslini-chi-varto-bratisya-za-tsyu-nishu-v-ukrayini-i-chi-mojna-zarobiti> (дата звернення 15.05.2024).
3. Никитюк Ю.А. Концептуальні положення збалансованого розвитку сировинної бази та переробки лікарських рослин. *Агроевіт.* 2016. № 5. С. 16-19.
4. D'Amelio F.S.Sr. Botanicals. A Phytocosmetic Desk Reference. Boca Raton: CRC Press, 1999. 361 p.
5. Patri F., Silano V. Plants in cosmetics: Plants and Plant Preparations Used as Ingredients for Cosmetic Products. Strasbourg: Council of Europe Publishing, 2002. 2018 p.
6. Korakhashvili A., Kacharava T., Kiknavelidze N. Biochemical structure of Calendula officinalis. *Georgian Medical News.* 2007. No. 7–8 (148–149). P. 70-73.
7. Varka E.-M., Tsatsaroni E., Xristoforidou N., Darda A.-M. Stability Study of O/W Cosmetic Emulsions Using Rosmarinus officinalis and Calendula officinalis Extracts. *Open J. Appl. Sci.* 2012. Vol. 02:1. P. 39-45.
8. Butnariu M., Coradini C.Z. Evaluation of biologically active compounds from calendula officinalis flowers using spectrophotometry. *Chem. Central. J.* 2012. Vol. 6:35. P. 1-7.
9. Isaac O. Die Ringelblume: Botanik, Chemie, Pharmakologie, Toxikologie, Pharmazie und therapeutische Verwendung. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 1992. P. 787.
10. Akhtar N., Shahiq-uz-zaman, Ali Khan B., Haji M., Khan S., Ahmad M., Rasool F., Mahmood T., Rasul A. Evaluation of various functional skin parameters using a topical cream of Calendula officinalis extract. *Afr. J. Pharm. Pharmacol.* 2011. Vol. 5. P. 199-206.
11. Andersen F.A., 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. Final report of the cosmetic ingredient review expert panel amended safety assessment of Calendula officinalis – derived cosmetic ingredients. *Int. J. Toxicol.* 2010. Vol. 29. P. 221-243.
12. Stegemann S. Patient centric drug product design in modern drug delivery as an opportunity to increase safety and effectiveness. *Expert. Opin. Drug. Deliv.* 2018. Vol. 15. P. 619-627.
13. Гарбарець Н.М., Гарбарець М.О. Рідкісні та зникаючі лікарські рослини України. Мала Червона книга лікарських рослин України. Тернопіль: Навчальна книга – Богдан, 2012. 88 с.
14. Попов О.П. Лікарські рослини в народній медицині. Київ: Здоров'я, 1965. 345 с.
15. Календули квітки. URL: <https://liktravy.ua/products/herbs/kalendula-kvitky>. (дата звернення 08.06.2024).
16. Фармакогнозія / В.С. Кисличенко та ін.; за ред. В. С. Кисличенко. Харків: НФаУ: Золоті сторінки, 2015. 735 с.
17. Косметична емульсія, збагачена біологічно активними добавками: пат. № 144145 Україна. № u202000613; заяв. 03.02.2020; опубл. 10.09.2020; бюл. № 17/2020. 4 с.
18. Білецький В.С. Симплекс-градчасте (центроїдне) планування експерименту. Харків: НТУ «ХПІ», 2021. 12 с.
19. Morávková T., Stern P. Rheological and Textural Properties of Cosmetic Emulsions. *Applied Rheology.* 2011. Vol. 21, no. 3. P. 35200.
20. Antolovich M., Prenzler P.D., Patsalides E., McDonald S., Robards K. Methods for testing antioxidant activity. *The Analyst.* 2002. Vol. 127. P. 183-198.
21. Hegerman A.E., Riedl K.M., Jones G., Sovik K.N., Rechar N.T., Hartzfeld P.W., Reichel T.L. High molecular weight plant polyphenolics (tannins) as biological antioxidants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry.* 1998. Vol. 46. P. 1887-1892.

22. Molina-Diaz A., Ortega-Carmona I., Pascual-Reguera M.I. Indirect spectrophotometric determination of ascorbic acid with ferrozine by flow-injection analysis. *Talanta*. 1998. Vol. 47. P. 531-536.
23. Berker K.I., Gueclue K., Tor I., Demirata B., Apak R. Total antioxidant capacity assay using optimized ferricyanide/Prussian blue method. *Food Analytical Methods*. 2010. Vol. 3. P. 154-168.
24. Pulido R., Bravo L., Saura-Calixto F. Antioxidant activity of dietary polyphenols as determined by a modified ferric reducing antioxidant power assay. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2000. Vol. 48. P. 3396-3402.
25. Prior R.L., Wu X., Schaich K. Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2005. Vol. 53. P. 4290-4302.
26. Bursal E., Köksal E., Gülçin İ., Bilsel G., Gören A.C. Antioxidant activity and polyphenol content of cherry stem (*Cerasus avium L.*) determined by LC-MS/MS. *Food Research International*. 2013. Vol. 51, Is. 1. P. 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.11.022>.
27. Dreher F., Maibach H.I. Protective effects of topical antioxidants in humans. *Curr. Probl. Dermatol*. 2001. Vol. 29. P. 157-164.
28. Yoshihisa Y., Honda A., Zhao Q.L., Makino T., Abe R., Matsui K., Shimizu H., Miyamoto Y., Kondo T., Shimizu T. Protective effects of platinum nanoparticles against UV-light-induced epidermal inflammation. *Exp. Dermatol*. 2010. Vol. 19. P. 1000-1006.
29. Bokov A., Chaudhuri A., Richardson A. The role of oxidative damage and stress in aging. *Mech. Ageing Dev*. 2004. Vol. 125. P. 811-826.
30. Промислова технологія лікарських засобів: / Є.В. Гладух та ін.; за ред. Є.В. Гладуха, В.І. Чуєшова. Х.: Новий Світ-2000, 2018. 486 с.
31. Bodor N., Buchwald P. Soft drug design: General principles and recent applications. *Medicinal Research Reviews*. 1999. Vol. 20(1):58. P. 101. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-1128\(200001\)20:1%3C58::AID-MED3%3E3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-1128(200001)20:1%3C58::AID-MED3%3E3.0.CO;2-X).
32. Гунько В.Г., Перцев І.М., Даценко Б.М., Белов С.Г. Проблеми створення осмотично активних лікарських систем для зовнішнього використання. *Фармац. журн.* 1991. No 3. С. 62-67.
33. Реотест-2.1. Цилиндрический и конусо-пластиночный ротационный вискозиметр. Инструкция по эксплуатации. URL: <http://www.twirpx.com/file/1543541>. (дата звернення 03.10.2021).
34. Leal-Calderon F., Schmitt V., Bibette J. Emulsion Science: Basic Principles. New York: Springer, 2007. 236 p.
35. Brummer R. Rheology Essentials of Cosmetic and Food Emulsions. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. 180 p.
36. Wasilewski T., Hordyjewicz-Baran Z., Zarębska M., Stanek N., Zajszy-Turko E., Tomaka M., Bujak T., Nizioł-Łukaszewska Z. Sustainable Green Processing of Grape Pomace Using Micellar Extraction for the Production of Value-Added Hygiene Cosmetics. *Molecules*. 2022. Vol. 27. 2444. <https://doi.org/10.3390/molecules27082444>
37. Parente M.E., Gámbaro A., Ares G. Sensory characterization of emollients. *Journal of Sensory Studies*. 2008. Vol. 23, Issue 2. P. 149-161.
38. Skin Analyzer. URL: <https://aliexpress.ru/item/4000096486652.html?spm=a2g2w.productlist.0.0.1b1e6b53Kkztw3> (дата звернення 15.05.2024).
39. Panico A., Serio F., Bagordo F., Grassi T., Idolo A., Giorgi M.D.E., Guido M., Congedo M., Donno A.D.E. Skin safety and health prevention: an overview of chemicals in cosmetic products. *J Prev Med Hyg*. 2019. Vol. 60(1). E50-E57.
40. Qassem M., Panayiotis K. Review of Modern Techniques for the Assessment of Skin Hydration. *Cosmetics*. 2019. Vol. 6, no. 1. P. 19. <https://doi.org/10.3390/cosmetics6010019>.

## References

1. Harhaun, R.V. (2021). *Rozrobka tekhnolohiyi zastosuvannya poliorhanosyloksaniv yak ekstrahentiv biolohichno aktivnykh rehovyn dlya emul'siy kosmetychnoho pryznachennya [Development of technology for the use of polyorganosiloxanes as extractants of biologically active substances for cosmetic emulsions]* [PhD thesis, Kherson National Technical University]. Open. <https://kntu.net.ua/ukr/content/download/88022/507269/file/%D0%94%D0%B8%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F%20%D0%93%D0%B0%D1%80%D0%B3%D0%B0%D1%83%D0%BD%20%D0%A0.%D0%92.%20161.pdf> [in Ukrainian].
2. *Likars'ki roslyny: chy varto braty za tsyu nishu v Ukraini i chy mozna zarobyt?* [Medicinal plants: is it worth taking up this niche in Ukraine and is it possible to make money?] <https://superagronom.com/articles/668-likarski-roslini-chi-varto-bratysya-za-tsyu-nishu-v-ukrayini-i-chi-mojna-zarobiti> (accessed 15.05.2024) [in Ukrainian].
3. Nikityuk, Yu. A. (2016). Kontseptual'ni polozhennya zbalansovanoho rozvytku syrovynnoyi bazy ta pererobky likars'kykh roslyn [Conceptual provisions of balanced development of the raw material base and processing of medicinal plants]. *Ahrosvit [Agroworld]*, 5, 16-19 [in Ukrainian].
4. D'Amelio, F.S.Sr. (1999). *Botanicals. A Phytocosmetic Desk Reference*. Boca Raton: CRC Press.
5. Patri, F., Silano, V. (2002). *Plants in cosmetics: Plants and Plant Preparations Used as Ingredients for Cosmetic Products*. Strasburg: Council of Europe Publishing.

6. Korakhashvili, A., Kacharava, T., Kiknavelidze, N. (2007). Biochemical structure of *Calendula officinalis*. *Georgian Medical News*, 7–8 (148–149), 70-73.
7. Varka, E.-M., Tsatsaroni, E., Xristoforidou, N., Darda A.-M. (2012). Stability Study of O/W Cosmetic Emulsions Using *Rosmarinus officinalis* and *Calendula officinalis* Extracts. *Open J. Appl.*, 02:1, 39-45.
8. Butnariu, M., Coradini, C.Z. (2012). Evaluation of biologically active compounds from *calendula officinalis* flowers using spectrophotometry. *Chem. Central. J.*, 6:35, 1-7.
9. Isaac, O. (1992). *Die Ringelblume: Botanik, Chemie, Pharmakologie, Toxikologie, Pharmazie und therapeutische Verwendung*. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft.
10. Akhtar, N., Shahiq-uz-zaman, B., Ali Khan, M., Haji, S., Khan, Ahmad, M., Rasool, F., Mahmood, T., Rasul, A. (2011). Evaluation of various functional skin parameters using a topical cream of *Calendula officinalis* extract. *Afr. J. Pharm. Pharmacol.*, 5, 199-206.
11. Andersen, F.A., 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. (2010). Final report of the cosmetic ingredient reviews expert panel amended safety assessment of *Calendula officinalis* – derived cosmetic ingredients. *Int. J. Toxicol.*, 29, 221-243.
12. Stegemann, S. (2018). Patient centric drug product design in modern drug delivery as an opportunity to increase safety and effectiveness. *Expert. Opin. Drug. Deliv.*, 15, 619-627.
13. Harbarets', N.M., Harbarets', M.O. (2012). *Ridkisini ta znykayuchi likars'ki roslyny Ukrayiny. Mala Chervona knyha likars'kykh roslyn Ukrayiny [Rare and endangered medicinal plants of Ukraine. Little Red Book of Medicinal Plants of Ukraine]*. Ternopil': Navchal'na knyha – Bohdan [in Ukrainian].
14. Popov, O.P. (1965). *Likars'ki roslyny v narodniy medytsyni [Medicinal plants in folk medicine]*. Kyiv: Zdorov'ya [in Ukrainian].
15. *Kalenduly kvitky [Calendulae Flores]*. <https://liktravy.ua/products/herbs/kalendula-kvitky> (accessed 08.06.2024) [in Ukrainian].
16. Kyslychenko, V.S., Zhuravel', I.O., Marchyshyn, S.M. et al. (2015). *Farmakohnoziya [Pharmacognosy]*. (V.S. Kyslychenko, Ed.). Kharkiv, NFAU: Zoloti storinky [in Ukrainian].
17. Harhaun, R.V., Kunyk, O.M., Sariybekova, D.H. (2020). *Kosmetychna emul'siya, zbahachena biolohichno aktyvnymy dobavkamy [Cosmetic emulsion enriched with biologically active additives]* Pat. UA 144145. Державна служба інтелектуальної власності України [State Service of Intellectual Property of Ukraine] [in Ukrainian].
18. Bilets'kyu, V.S. (2021). *Sympleks-hratchaste (tsentroyidne) planuvannya eksperymentu [Simplex-lattice (centroid) planning of the experiment]*. Kharkiv: NTU «KHPI» [in Ukrainian].
19. Morávková, T., P., Stern. (2011). Rheological and Textural Properties of Cosmetic Emulsions. *Applied Rheology*, 21, 3, 35200. <https://doi.org/10.3933/applrheol-21-35200>.
20. Antolovich, M., Prenzler, P.D., Patsalides, E., McDonald, S., Robards, K. (2002). Methods for testing antioxidant activity. *The Analyst*, 127, 183-198.
21. Hegerman, A.E., Riedl, K.M., Jones, G., Sovik, K.N., Rechard, N.T., Hartzfeld, P.W., Reichel, T.L. (1998). High molecular weight plant polyphenolics (tannins) as biological antioxidants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46, 1887-1892.
22. Molina-Diaz, A., Ortega-Carmona, I., Pascual-Reguera, M.I. (1998). Indirect spectrophotometric determination of ascorbic acid with ferrozine by flow-injection analysis. *Talanta*, 47, 531-536.
23. Berker, K.I., Gueclue, K., Tor, I., Demirata, B., Apak, R. (2010). Total antioxidant capacity assay using optimized ferricyanide. Prussian blue method. *Food Analytical Methods*, 3, 154-168.
24. Pulido, R., Bravo, L., Saura-Calixto, F. (2000). Antioxidant activity of dietary polyphenols as determined by a modified ferric reducing antioxidant power assay. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48, 3396-3402.
25. Prior, R.L., Wu, X., Schaich, K. (2005). Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53, 4290-4302.
26. Bursal, E., Köksal, E., Gülçin, İ., Bilsel, G., Gören, A.C. (2013). Antioxidant activity and polyphenol content of cherry stem (*Cerasus avium L.*) determined by LC–MS/MS. *Food Research International*, 51, 1, 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.11.022>.
27. Dreher, F., Maibach, H.I. (2001). Protective effects of topical antioxidants in humans. *Curr. Probl. Dermatol*, 29, 157-164.
28. Yoshihisa, Y., Honda, A., Zhao, Q.L., Makino, T., Abe, R., Matsui, K., Shimizu, H., Miyamoto, Y., Kondo, T., Shimizu, T. (2010). Protective effects of platinum nanoparticles against UV-light induced epidermal inflammation. *Exp. Dermatol*, 19, 1000-1006.
29. Bokov, A., Chaudhuri, A., Richardson, A. (2004). The role of oxidative damage and stress in aging. *Mech. Ageing Dev*, 125, 811-826.
30. Hladukh, Ye.V., Ruban, O.A., Sayko, I.V. et al. (2018). *Promyslova tekhnolohiya likars'kykh zasobiv [Industrial technology of medicines]* (Ye.V. Hladukh, V.I. Chuyeshov, Ed.). Kharkiv: Novyy Svit-2000 [in Ukrainian].

31. Bodor, N., Buchwald, P. (1999). Soft drug design: General principles and recent applications. *Medicinal Research Reviews*, 20(1):58, 101. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-1128\(200001\)20:1%3C58::AID-MED3%3E3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-1128(200001)20:1%3C58::AID-MED3%3E3.0.CO;2-X).
32. Hun'ko, V.H., Pertsev, I.M., Datsenko, B.M., Belov, S.H. (1991). Problemy stvorenniya osmotychno aktyvnykh likars'kykh system dlya zovnishn'oho vykorystannya [Problems of creating osmotically active medicinal systems for external use]. *Farmats. zhurn. [Pharmac. journal]*, 3, 62-67 [in Ukrainian].
33. *Reotest-2.1. Tsylyndrycheskyy y konuso-plastynochnyy rotatsyonnyy vyskozometr. Ynstruktsyya po ekspluatatsyy [Cylindrical and cone-plate rotational viscometer. Operating instructions]* <http://www.twirpx.com/file/1543541> (accessed 08.06.2024) [in russian].
34. Leal-Calderon, F., Schmitt, V., Bibette, J. (2007). *Emulsion Science: Basic Principles*. New York: Springer.
35. Brummer, R. (2006). *Rheology Essentials of Cosmetic and Food Emulsions*. Berlin, Heidelberg: Springer.
36. Wasilewski, T., Hordyjewicz-Baran, Z., Zarębska, M., Stanek, N., Zajszy-Turko, E., Tomaka, M., Bujak, T., Nizioł-Łukaszewska, Z. (2022). Sustainable Green Processing of Grape Pomace Using Micellar Extraction for the Production of Value-Added Hygiene Cosmetics. *Molecules*, 27, 2444. <https://doi.org/10.3390/molecules27082444>.
37. Parente, M.E., Gámbaro, A., Ares, G. (2008). Sensory characterization of emollients. *Journal of Sensory Studies*, 23, 2, 149-161.
38. *Skin Analyzer*. <https://aliexpress.ru/item/4000096486652.html?spm=a2g2w.productlist.0.0.1b1e6b53Kkztw3> (accessed 08.06.2024).
39. Panico, A., Serio, F., Bagordo, F., Grassi, T., Idolo, A., Giorgi, M.D.E., Guido, M., Congedo, M., Donno, A.D.E. (2019). Skin safety and health prevention: an overview of chemicals in cosmetic products. *J Prev Med Hyg*, 60(1), E50-E57.
40. Qassem, M., Panayiotis, K. (2019). Review of Modern Techniques for the Assessment of Skin Hydration. *Cosmetics*, 6, 1, 19. <https://doi.org/10.3390/cosmetics6010019>.



Л. В. САЛЄБА

кандидат технічних наук, доцент,  
завідувач кафедри хімічних технологій, експертизи  
та безпеки харчової продукції  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-8290-4163

Р. В. ГАРГАУН

кандидат технічних наук  
ORCID: 0000-0002-6855-2069

## ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЕФІРНОЇ ОЛІЇ М'ЯТИ ПЕРЦЕВОЇ ДЛЯ КОСМЕТИЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ НА ЕМУЛЬСІЙНІЙ ОСНОВІ

*В залежності від знаходження ефірної олії у різних органах та тканинах рослинного матеріалу вся ефіроолійна сировина поділяється на види. Однією з найвідоміших ефіроолійних культур є м'ята. Стаття присвячена дослідженню використання ефірної олії м'яти для покращення споживчих характеристик емульсійних косметичних кремів. Для дослідження використовували ефірну олію м'яти перцевої 100% виробництва ТОВ «Адверсо» Україна і базову емульсію прямого типу з вмістом жиркової фази 25%.*

*Ефірна олія м'яти перцевої (Mentha piperita Oil) завдяки своєму складу широко використовується як ароматизатор для харчових продуктів, в парфумерії, фармацевтиці, ароматерапії. Науковцями проводяться удосконалення процесів отримання комерційних ефірних олій та виділення із них індивідуальних речовин, оскільки технологія отримання впливає на хімічний склад готового продукту. Аналіз літературних джерел свідчить, що парова дистиляція є достатньо ефективним, технологічно зручним і економічним методом. Значною перевагою цього методу є відсутність фототоксичності та обмежень IFRA. Показники якості олії мають відповідати ДСТУ 4152-2003 «Олія ефірна м'ятна. Технічні умови».*

*Ефірна олія може входити до складу косметичних засобів не тільки як запашина речовина, але й як компонент здатний проявляти направлений ефект при використанні у кількості 1 – 3%. Проведено дослідження впливу концентрації ефірної олії м'яти на сенсорні властивості косметичної емульсії. Показано, що найбільший вплив на щільність і консистенцію емульсії мають концентрації ефірної олії м'яти 2,5 та 3%, що пояснюється терпеновою природою основних складових ефірної олії. Наявність у складі ментолу сприяє зниженню відчуття жирності на шкірі відносно базового зразка. При концентрації 2 – 2,5% відмічено високу адгезію, рівномірний розподіл емульсії по поверхні шкіри без відчуття липкості і швидке поглинання протягом 1,5 хвилин. Найбільш ефективною концентрацією обрано 2% ефірної олії у складі косметичної емульсії, оскільки збільшення до 3% викликає дуже різко виражений запах.*

**Ключові слова:** ефірна олія, косметична емульсія, органолептичні показники, сенсорні властивості.

L. V. SALEBA

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Head of the Department of Chemical Technologies, Expertise  
and Provisions Production Safety  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0002-8290-4163

R. V. HARHAUN

Candidate of Technical Sciences  
ORCID: 0000-0002-6855-2069

## PERSPECTIVES OF USING PEPPERMINT ESSENTIAL OIL FOR EMULSION-BASED COSMETIC PRODUCTS

*Depending on the presence of essential oil in various organs and tissues of plant material, all essential oil raw materials are divided into types. One of the most famous essential oil crops is mint. The article is devoted to the study of the use of mint essential oil to improve the consumer characteristics of emulsion cosmetic creams. The research used peppermint essential oil 100% produced by Adverso LLC Ukraine and a basic emulsion of the direct type with a fat phase content of 25%.*

*Due to its composition, peppermint essential oil (Mentha piperita Oil) is widely used as a flavoring agent for food products, in perfumery, pharmaceuticals, and aromatherapy. Scientists are improving the processes of obtaining*

commercial essential oils and extracting individual substances from them, since the technology of obtaining them affects the chemical composition of the finished product. The analysis of literary sources shows that steam distillation is a sufficiently effective, technologically convenient and economical method. A significant advantage of this method is the lack of phototoxicity and IFRA limitations. Oil quality indicators must comply with DSTU 4152-2003 "Mint essential oil. Technical conditions".

Essential oil can be part of cosmetic products not only as a fragrant substance, but also as a component capable of exerting a directed effect when used in an amount of 1-3%. The effect of the concentration of mint essential oil on the sensory properties of the cosmetic emulsion was studied. It was shown that concentrations of mint essential oil of 2.5 and 3% have the greatest effect on the density and consistency of the emulsion, which is explained by the terpene nature of the main components of the essential oil. The presence of menthol in the composition helps to reduce the feeling of greasiness on the skin compared to the base sample. At a concentration of 2-2.5%, high adhesion, uniform distribution of the emulsion on the surface of the skin without a feeling of stickiness, and rapid absorption within 1.5 minutes were noted. The most effective concentration was chosen to be 2% of the essential oil in the composition of the cosmetic emulsion, since an increase to 3% causes a very pronounced smell.

**Key words:** essential oil, cosmetic emulsion, organoleptic indicators, sensory properties.

### Постановка проблеми

Природні ефірні олії широко використовуються як самостійний продукт, так і при виробництві харчових продуктів (50% від загального обсягу виробництва), парфумерії (30%), косметичних засобів (5%), товарів побутового вжитку, в сфері фармацевтики (15%) та медичної ароматерапії (близько 1%) [1]. Останнім часом, маркетологи відмічають зростання споживання ефірних олій у середньому на 6 – 8% щороку і прогнозують збереження такої тенденції до 2030 року [2, 3], що пов'язано не тільки із попитом на органічні продукти, але й фармакологічною активністю ефірних олій, здатністю ефективно лікувати багато поширених серед населення хвороб (ревматизм, невралгію, простудні захворювання, захворювання ротової порожнини і ШКТ), використанням для ароматерапії.

Відомо, що на якість ефірної олії впливає багато зовнішніх факторів, це кліматичні умови вирощування рослин, їх біологічна стиглість, метеорологічні умови і час збирання, умови зберігання. Але найважливішим фактором є технологія виробництва. На сьогодні існує кілька ефективних способів виробництва ефірних олій для отримання якісної продукції: дистиляція водою або водяною парою, методом холодного віджиму, гідродифузії, екстракція органічними розчинниками або надкритичними рідинами. Вибір способу залежить від морфолого-анатомічних властивостей сировини, кількості та хімічного складу ефірної олії і галузі застосування.

Серед різних видів сировини багатих на ефірну олію виділяється рослинна трав'яниста сировина. До неї належить рослина м'яти перцевої (*Mentha piperita*), яка займає друге місце за обсягами переробки і одержання ефірної олії.

Ефірна олія м'яти може застосовуватися як окремий косметичний засіб у чистому вигляді, так і у складі косметичних кремів, тоніків, лосьйонів, зубних паст і ополіскувачів для догляду за ротовою порожниною. В залежності від кількості ефірної олії у складі косметичного засобу, вона може виконувати функції ароматизатора, антиоксиданту або біологічно активної добавки. Ефірна олія м'яти перцевої має бактерицидну, протівірусну, протигрибкову дію, є жарознижувальним засобом, усуває спазми судин головного мозку [4].

Дослідження технології виробництва ефірних олій, на прикладі ефірної олії м'яти перцевої, є актуальним і на сьогоднішній день, оскільки впливає на її якість і перспективи використання для косметичних засобів.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Пошуки шляхів отримання ефірних олій науковцями [5] продовжуються за трьома напрямками: удосконалення процесів отримання комерційних ефірних олій; вилучення ефірних олій із рідкісних рослин з максимальним збереженням природного складу для дослідження фармакологічних властивостей; виділення індивідуальних речовин для створення фармацевтичних або косметичних препаратів.

Дослідження ринку показали домінування у 2023 році методу парової дистиляції, який є достатньо ефективним, технологічно зручним, економічним, потребує низьких інвестицій і може бути розташований поблизу виробничого підприємства [3]. Серед переваг дистиляційних ефірних олій слід відмітити повну відсутність фототоксичності та обмежень IFRA. Останнім часом дослідження проводять з метою фізичної інтенсифікації вилучення ефірних олій, наприклад мікрохвильовою дистиляцією, та для оптимізації робочих параметрів щодо виходу, складу, часу та кінетики вилучення [6]. Корелюючи тиск і кількість водяної пари при паровій відгонці можна регулювати глибину відбору ефірної олії. Слід пам'ятати, що за високих температур можливе розкладання ароматичних речовин з утворенням сесквітерпенових лактонів, які значно погіршують аромат. Існують дослідження про можливість змішування дистиляційної олії з когобаційною, якщо остання не містить жирних і гетероциклічних амінів, альдегідів, кислот і спиртів. Також встановлено, що свіжі суцвіття рослини, зрізані на рівні розгалуження стебел, при наявності не менше 50% розкритих квіток м'яти у центральному суцвітті містять у 3,3 рази більше ефірних олій у порівнянні з висушеною сировиною [5].

Ефірна олія м'яти перцевої (*Mentha piperita Oil*) містить у своєму складі монотерпеноїди: ментол (50 – 80%), ментон (20 – 30%), пулегон, піперитон, карвон, терпінен-4-ол, октан-3-ол, ментофуран, ментилацетат, ментилвалеріанат, лімонен,  $\alpha$ - і  $\beta$ -пінен; сесквітерпени: каріофілен й азуленоген гвайен (ідентифіковано понад 30 компонентів). Крім того, у листі м'яти виявлені тритерпенові кислоти: урсолова й олеанолова; каротиноїди; стероли; бетаїн; флавоноїди: апігенін, лютеолін, гесперидин, антоціани і лейкоантоціани; дубильні речовини; мінеральні речовини: Zn, Se, Cu, Mn, Sr тощо [4].

Вона активно використовується в складі косметичних засобів завдяки таким властивостям: заспокоює і охолоджує шкіру, знімаючи подразнення, почервоніння і набряки; має бактерицидну, протизапальну, антисептичну та знеболувальну дію; допомагає боротися з вугровим висипом і дерматитом; сприяє звуженню пор і нормалізує роботу сальних залоз; покращує колір обличчя, усуваючи тьмяні та землісті відтінки; і покращує кисневий обмін.

#### Формулювання мети дослідження

Метою роботи є визначення впливу ефірної олії м'яти, отриманої методом дистиляції водяною парою, на органолептичні властивості косметичної емульсії, шляхом визначення основних сенсорних показників якості.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Ефірні олії не тільки забезпечують корисні властивості, такі як антисептичний, бактеріостатичний, дезінфікуючий, заспокійливий та антиоксидантний ефект, але й значно впливають на органолептичні характеристики косметичних засобів – запах, текстуру та колір [7, 8]. Ці властивості можуть покращити сприйняття продукту споживачами, підвищуючи його привабливість і ефективність. Зважаючи на це дослідження в цьому напрямку можуть бути перспективними для розвитку косметичної індустрії.

У якості об'єкту дослідження була обрана ефірна олія м'яти перцевої 100% виробництва ТОВ «Адверсо» Україна та виготовлений зразок косметичної емульсії прямого типу «о/в», з вмістом жирової фази 25%.

У якості ароматизаторів та запаших речовин природні ефірні олії використовують у кількості 0,5 – 1%. При концентрації 1 – 3% ефірні олії вже виступають активними компонентами косметичного засобу, оскільки здатні проявляти направлені ефекти [8].

М'ятну ефірну олію отримують із двох видів сировини: підв'ялених цілих рослин вологістю 40 – 60% і сухих обмолочених листків та суцвіть вологістю 14%. Незважаючи на більш низькі витрати по переробці сухого обмолоченого листя і більш високу якість отриманої олії – сирцю, економічно більш вигідною є переробка м'яти цілими підв'яленими рослинами. Олію м'яти перцевої отримують зі свіжозібраної надземної частини перегонкою з водяною парою [8]. Вихід ефірної олії-сирцю з підв'яленої м'яти вологістю 55% складає 0,35 – 0,40%, або 1,9 – 2,3% в перерахунку на сухі листя та суцвіття.

Товарною є ефірна олія-ректифікат, яка відповідає вимогам ДСТУ 4152-2003 «Олія ефірна м'ятна. Технічні умови»: питома вага  $d_{20}^{20}$  0,900 – 0,910; показник заломлення –  $n_D^{20}$  1,459 – 1,470; кислотне число не вище 0,7 мг КОН/г; вміст зв'язаного ментолу 4 – 10%; вміст вільного та зв'язаного ментолу – не менше 50%; вміст ментону – не більше 30%; розчинність у чотирьох об'ємах 70%-вого етилового спирту.

Високий вихід ефірної олії м'яти при знижених енергозатратах досягається при переробці підв'яленої сировини в апараті-контейнері продуктивністю 730 – 580 кг/год. відповідно до часу циклу, з якого утворюють перегінну установку зі швидкістю гонки 500 – 600 л/год. Процес декантації м'ятної ефірної олії потрібно проводити при температурі 45 – 50°C. Концентрація ефірної олії в дистиляційній воді після прийомника-олієроздільника 0,06%. Вторинну ефірну олію отримують при максимальній продуктивності когобаційної установки. Оскільки вторинна олія містить більше ментолу ніж первинна, їх купажують, зневоднюють відстоюванням і направляють на ректифікацію [8]. Вакуум-ректифікацію м'ятної олії-сирцю проводять під тиском 3,3 кПа в дві стадії: на першій отримують збагачену олію та головні фракції, на другій – олію-ректифікат та смоли. Метод відгонки олій з водяною парою є пожегобезпечним, нешкідливим, проте може спостерігатися погіршення якості ефірних олій в зв'язку з хімічними перетвореннями компонентів, особливо таких, як терпенові спирти та їх складні ефіри, а також втрати цінних ароматуювальних речовин, нелетких з водяною парою. Подальше удосконалення методу має бути направлено на покращення якості та збільшення виходу ефірної олії, створення технологій з комплексною переробкою відходів.

В роботі проводили дослідження впливу концентрації ефірної олії м'яти на органолептичні і сенсорні властивості базової косметичної емульсії прямого типу.

Органолептичні дослідження показують як саме впливає концентрація ефірної олії м'яти на властивості емульсії. Оскільки, вибір споживачем косметичного емульсійного крему значною мірою залежить від сенсорного сприйняття косметичного засобу, в роботі проводили визначення таких показників якості косметичної емульсії: текстура емульсії «Кушон-ефект»; органолептичний ефект щільності і консистенції емульсії «Ефект послідовності»; адгезія; ступінь розподілу, жирність, в'язкість і липкість емульсії; поглинання емульсії шкірою. Використовуючи значення таких характеристик косметичного засобу виробники здатні розробити або удосконалити існуючий засіб, що буде максимально відповідати потребам споживачів.

Наприклад, ефект «Кушон» свідчить про відчуття при контакті зі шкірою, як крем наноситься, розподіляється, на скільки багато його потрібно використати для повного покриття шкіри без відчуття «плівки». Значний вплив

на ступінь щільності і консистенцію мають властивості і концентрація емульгатора, але і інші компоненти косметичного засобу можуть викликати ефект ущільнення текстури емульсії, покращувати консистенцію, сприяти утриманню косметичного засобу на кінчику пальця. Дані ефекти оцінюються шляхом різкого розірвання контакту між шкірою пальців та косметичною емульсією з утворенням характерного «конусу» та легкістю набору косметичного засобу. В'язкість як органолептичний показник визначає ступінь залишку липкого шару на шкірі після нанесення. Даний показник є важливою характеристикою якості косметичного засобу, оскільки в'язкі засоби з ефектом липкості викликають відчуття дискомфорту.

Результати аналізу зразків косметичної емульсії за бальною шкалою від 1 до 5 наведені у табл. 1.

Таблиця 1

### Органолептична оцінка впливу ефірної олії м'яти на сенсорні властивості базової косметичної емульсії

Показники емульсії	Кількість балів в залежності від концентрація ефірної олії м'яти, %						
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Ефект «Кушон»	3	3	3	3	3	4	4
Щільність	1	2	2	3	3	4	4
Адгезія	2	2	3	3	4	4	3
Ступінь розподілу	2	2	2	3	4	4	3
В'язкість і липкість	3	4	4	3	3	3	3
Жирність через 2-3 хв.	2	3	3	4	4	4	4
Жирність через 30 хв.	3	4	4	4	4	4	4
Поглинання, хв./бали	2,5/2	2,5/2	2,2/3	1,8/4	1,5/5	1,5/5	1,5/5

Згідно отриманих результатів можна зазначити, що ефірні олії, на прикладі ефірної олії м'яти, здатні проявляти позитивний вплив на основні органолептичні і сенсорні властивості косметичних емульсій. Досить виражений вплив можна спостерігати при введенні ефірної олії у концентраціях 1,5 – 2,5%.

При цьому слід відзначити незначний вплив ефірної олії на ефект «Кушон» косметичної емульсії та жирність після нанесення. Найбільш виражений вплив на «Ефект послідовності» проявляють концентрації ефірної олії м'яти 2,5 та 3%, оскільки основні складові ефірної олії мають терпенову природу і здатні викликати відчуття щільності текстури, а «конуси» утворені при розриві контакту між подушечками пальців з нанесеним кремом мають кращу стійкість. Чим більша адгезія, тим краще і рівномірніше розподіляється емульсія. Про це також свідчить оцінка впливу концентрації ефірної олії (2 – 2,5%) на показники адгезії і ступінь розподілу. Результати бальної оцінки органолептичного ефекту жирності свідчать, що завдяки метолу ефірна олія м'яти сприяє зниженню відчуття жирності на шкірі відносно базового зразка одразу і збереження ефекту впливу через 30 хв. після нанесення. Аналіз властивості до поглинання емульсії шкірою свідчить, що ефірна олія м'яти сприяє швидшому поглинанню компонентів емульсії відносно базового зразка. Найбільш ефективною концентрацією для застосування у складі косметичного крему є 2% ефірної олії, оскільки збільшення концентрації викликає дуже різко виражений запах м'яти.

В Україні існує високий потенціал щодо сировинної бази для виробництва ефірних олій, особливо на півдні країни. Таким чином, виробництво ефірних олій, в тому числі ефірної олії м'яти, є актуальним завданням у повсякденному розвитку економіки країни. Перспективними напрямками є використання найбільш поширеної ефірної олії м'яти у складі емульсійних косметичних засобів, включення її до рецептури при виробництві оздоровчих продуктів харчування, а також застосування при виробництві фармацевтичних препаратів та для ароматерапії.

### Висновки

Як загальний висновок можна сказати, що ефірні олії, на прикладі ефірної олії м'яти, здатні проявляти позитивний вплив на основні органолептичні характеристики косметичних емульсій. Це підтверджує доцільність їх використання у складі косметичних засобів не лише як запаших речовин, а й як активних компонентів. Слід зазначити, що технологія отримання ефірної олії також відіграє важливу роль при визначенні місця і кількості застосування ефірної олії. Оскільки від методу одержання залежить якісний і кількісний склад хімічних речовин в ефірній олії. Отримані результати показують перспективність подальших досліджень у цьому напрямку з використанням більш точних методів аналізу.

### Список використаної літератури

1. Своя ніша: що треба знати про ринок ефірних олій. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://agravery.com/uk/posts/show/svoa-nisa-so-treba-znati-pro-rinok-efirnih-olij>
2. Танасійчук А.М. Міжнародне маркетингове дослідження ринку ефірних олій / А.М. Танасійчук, С.О. Сіренко, Л.Б. Мартинова // Modern Economics. 2021. № 27. С. 188–195.
3. Essential Oils Market Size, Share & Trends. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/essential-oils-market#>

4. Фармацевтична енциклопедія. М'ята. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/article/1525/m-yata>
5. Фролова Н.Е. Теоретичне обґрунтування і розроблення технологій натуральних концентрованих ароматизаторів із ефіроолійної сировини: дис... д-ра. техн. наук : 05.18.06 / Фролова Наталія Епінетівна. Київ, 2017. 439 с.
6. Sahraoui N., Sabbaa N., Bertouchea S., Boutekedjiret Ch. Optimization of operating parameters in extraction of essential oils from *Lavandula angustifolia* flowers by microwave assisted steam distillation. *Desalination and Water Treatment*, 2022. Vol. 279. P. 96–101.
7. Лікарська рослинна сировина та фітопрепарати : посіб. з фармакогнозії з основами біохімії лікар. рослин. / Н.М. Солодовниченко, М.С. Журавльов, В.М. Ковальов. Харків: Золоті сторінки, 2001. 408 с.
8. Технологія парфумерно-косметичних продуктів / Л.В. Пешук, Л.І. Бавіка, І.М. Демидов. К. : Центр учбової літератури, 2007. 376 с.

#### References

1. Svoia nisha: shcho treba znaty pro rynek efirnykh olii. [Your niche: what you need to know about the market of essential oils]. (n.d.). *agravery.com*. Retrieved from <https://agravery.com/uk/posts/show/svoa-nisa-so-treba-znati-pro-rynok-efirnih-olij> [in Ukrainian].
2. Tanasiichuk A. M., Sirenko S.O., Martynova L.B. (2021) Mizhnarodne marketynhove doslidzhennia rynku efirnykh olii [International marketing research of the market of essential oils]. *Modern Economics*. 27. 188–195. [in Ukrainian].
3. Essential Oils Market Size, Share & Trends. Retrieved from <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/essential-oils-market#> [in English].
4. Farmatsevychna entsyklopediia. Miata. [Pharmaceutical encyclopedia. Mint]. (n.d.). Retrieved from <https://www.pharmencyclopedia.com.ua/article/1525/m-yata> [in Ukrainian].
5. Frolova, N.E. (2017). Teoretychne obgruntuvannia i rozroblennia tekhnolohii naturalnykh kontsentrovanykh aromatyzatoriv iz efirooliinoi syrovyny [Theoretical substantiation and development of technologies of natural concentrated flavorings from essential oil raw materials]. *Doctor's thesis*. Kyiv. [in Ukrainian].
6. Sahraoui N., Sabbaa N., Bertouchea S., Boutekedjiret Ch. (2022) Optimization of operating parameters in extraction of essential oils from *Lavandula angustifolia* flowers by microwave assisted steam distillation. *Desalination and Water Treatment*. 279. 96–101. [in English].
7. Solodovnychenko N.M., Zhuravlov M.S., Kovalov V.M. (2001) *Likarska roslynna syrovyna ta fitopreparaty* [Medicinal plant raw materials and phytopreparations]. Kharkiv: Zoloti storinky [in Ukrainian].
8. Peshuk L.V., Bavika L.I., Demydov I.M. (2007) *Tekhnolohiia parfumerno-kosmetychnykh produktiv* [Technology of perfumery and cosmetic products]. Kyiv : Tsentri uchbovoi literatury [in Ukrainian].

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

UDC 681.004.89:164.053

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.26>

V. G. VASENKO

Student at the Department of Computer Science  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0009-0003-2558-2588

N. V. KORNILOVSKA

Associate Professor at the Department of Computer Science  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0002-8331-8027

S. V. VYSHEMYRSKA

Associate Professor at the Department of Computer Science  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0002-6343-7512

M. V. KARAMUSHKA

Associate Professor at the Department of Computer Science  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0001-5982-4598

## ACCELERATING IMAGE PROCESSING USING PARALLEL COMPUTATIONS IN OPENMP: DEVELOPMENT AND PERFORMANCE ANALYSIS OF A GRAPHICS EDITOR

*In today's digital world, image processing plays a crucial role in various aspects of human life. From creating visual content for social media to analyzing medical images, powerful tools for image manipulation are in constant demand. The growing requirements for image quality and processing speed make the search for efficient methods to accelerate these processes highly relevant.*

*This paper investigates the development and implementation of a graphics editor that utilizes OpenMP parallel computing to accelerate data processing. This technology enables the efficient distribution of computational tasks across multiple processor cores, significantly improving system performance. The developed software offers a set of popular graphic effects, including negative, grayscale, sepia, blur, sharpening, and posterization. Each effect is implemented in both sequential and parallel modes using OpenMP, allowing for the comparison of different computational approaches.*

*To evaluate the effectiveness of the proposed solution, a series of experiments were conducted on images of various sizes. These experiments involved applying each effect to images ranging from small icons to high-quality photographs. A comparative analysis of the efficiency of sequential and parallel computation methods demonstrated the significant advantages of the latter. The results of the study show a substantial acceleration of image processing when using OpenMP technology. This acceleration is particularly noticeable for computationally intensive effects such as blurring or sharpening, and when working with large images. In some cases, it was possible to achieve a significant increase in processing speed, opening up new possibilities for working with large volumes of graphic data.*

*This research has significant practical value for software developers working on optimizing the performance of graphics editors and other image processing applications. It demonstrates how the application of modern parallel computing technologies can significantly improve the efficiency of working with graphic data, paving the way for the creation of more powerful and faster image processing tools.*

**Key words:** *graphics editor, parallel computing, OpenMP, Qt, image processing, performance optimization, C++.*

В. Г. ВАСЕНКО

студент кафедри інформатики і комп'ютерних наук  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0009-0003-2558-2588

Н. В. КОРНІЛОВСЬКА

доцент кафедри інформатики і комп'ютерних наук  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-8331-8027

С. В. ВИШЕМИРСЬКА

доцент кафедри інформатики і комп'ютерних наук  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-6343-7512

М. В. КАРАМУШКА

доцент кафедри інформатики і комп'ютерних наук  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0001-5982-4598

## ПРИСКОРЕННЯ ОБРОБКИ ГРАФІЧНИХ ДАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ В ORENMP: РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ ГРАФІЧНОГО РЕДАКТОРА ЗОБРАЖЕНЬ

У сучасному світі цифрових технологій обробка графічних даних відіграє ключову роль у багатьох сферах життєдіяльності людини. Від створення візуального контенту для соціальних мереж до аналізу медичних знімків – усюди потрібні потужні інструменти для маніпуляції зображеннями. Зростаючі вимоги до якості та швидкості обробки зображень роблять актуальним пошук ефективних методів прискорення цих процесів.

У цій роботі досліджується розробка та впровадження графічного редактора зображень з використанням паралельних обчислень на основі технології OpenMP для прискорення обробки даних. Ця технологія дозволяє ефективно розподіляти обчислювальні завдання між декількома ядрами процесора, що значно підвищує продуктивність системи. Розроблене програмне забезпечення пропонує набір популярних графічних ефектів, включаючи негатив, відтінки сірого, сепію, розмиття, підвищення різкості та пастеризацію. Кожен з цих ефектів реалізовано у двох режимах: послідовному та паралельному з використанням OpenMP. Це дозволяє не тільки обробляти зображення, але й порівнювати ефективність різних підходів до обчислень.

Для оцінки ефективності запропонованого рішення проведено серію експериментів з обробки зображень різної розмірності. Ці експерименти включали застосування кожного ефекту до зображень різного розміру – від маленьких іконок до високоякісних фотографій. Порівняльний аналіз ефективності послідовного та паралельного методів обчислення показав значні переваги останнього. Результати дослідження демонструють суттєве прискорення обробки зображень при застосуванні технології OpenMP. Особливо помітним це прискорення стає для ресурсоемних ефектів, таких як розмиття чи підвищення різкості, та при роботі з зображеннями великої розмірності. У деяких випадках вдалося досягти багатократного збільшення швидкості обробки, що відкриває нові можливості для роботи з великими обсягами графічних даних.

Дане дослідження має значну практичну цінність для розробників програмного забезпечення, що працюють над оптимізацією продуктивності графічних редакторів та інших застосунків для обробки зображень. Воно демонструє, як застосування сучасних технологій паралельних обчислень може суттєво підвищити ефективність роботи з графічними даними, відкриваючи шлях до створення більш потужних та швидких інструментів обробки зображень.

**Ключові слова:** графічний редактор, паралельні обчислення, OpenMP, Qt, обробка зображень, оптимізація продуктивності, C++.

### Problem statement

The increasing complexity of image processing tasks, coupled with the proliferation of multi-core processors, has necessitated the exploration of parallel computing techniques to enhance performance. This research focuses on developing a graphics editor that effectively utilizes parallel processing to accelerate image manipulation operations.

By leveraging the computational power of multi-core processors and employing parallel programming techniques, we aim to create a high-performance graphics editor that can handle large images and complex image processing pipelines efficiently. Traditional sequential image processing algorithms often struggle to meet the demands of modern applications, which require real-time processing and high-quality results. Parallel computing offers a promising solution to these challenges by distributing the computational workload across multiple cores, leading to significant performance improvements.

The proposed graphics editor will incorporate a wide range of image processing functionalities, including image enhancement, filtering, segmentation, and analysis. These operations are often computationally intensive, requiring significant processing power to achieve satisfactory results. By parallelizing these tasks, we can reduce processing times and enable users to manipulate images more efficiently.

Furthermore, the graphics editor will be designed to handle large images, which are becoming increasingly common in fields such as medical imaging, scientific visualization, and digital photography. Traditional image processing algorithms can struggle to process large images in a timely manner, leading to bottlenecks and reduced user productivity. By leveraging parallel computing, we can overcome these limitations and enable users to work with large images seamlessly.

In addition to performance improvements, the graphics editor will also prioritize user experience. A well-designed interface and intuitive tools will make it easy for users to apply various image processing techniques and achieve desired

results. The editor will also provide features for saving and sharing processed images, facilitating collaboration and workflow efficiency.

Overall, this research aims to develop a graphics editor that represents a significant advancement in the field of image processing. By effectively utilizing parallel computing techniques, the editor will provide a powerful and efficient tool for users to manipulate images, leading to improved productivity, enhanced creativity, and new possibilities for applications across various domains.

**Research publications**

The development of a graphics editor that effectively utilizes parallel computing to accelerate image manipulation operations is based on a significant body of previous research. Contemporary research in image processing highlights the growing need for efficient algorithms capable of handling large datasets and performing complex operations in real-time.

Key research areas that underpin this study include: studies by [1] and [2] have introduced new parallel algorithms for operations such as filtering, segmentation, and object recognition. These studies have demonstrated significant computational speedups through the parallelization of computational tasks.

Studies by [3, 4] have explored the use of Graphics Processing Units (GPUs) for accelerating various image processing operations. The results of these studies have shown the high efficiency of GPUs for highly parallel computations. User interfaces for graphics editors [5] have focused on developing intuitive user interfaces for graphics editors, allowing users to effectively perform various image processing tasks.

Specifically, studies by [6] have been dedicated to the development of parallel algorithms for Gaussian blurring, one of the most common operations in image processing. These studies have shown that the parallel implementation of this algorithm can significantly reduce computation time, especially for large images.

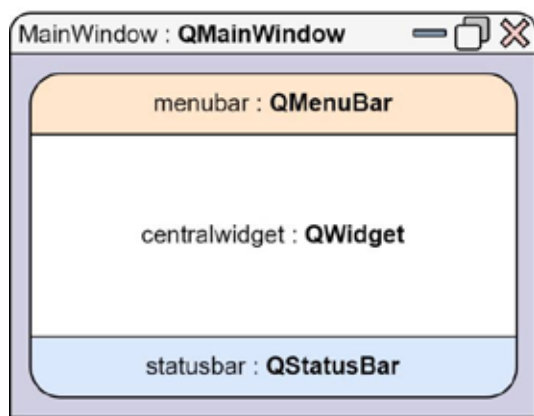
**The main material**

The aim of this study is to develop a graphics editor using the Qt library [7, 12] for image processing employing OpenMP technology [10, 11] and to compare its performance in sequential and parallel modes.

To achieve this goal, the following tasks were completed:

- Development of software with a graphical user interface based on C++ [8] and Qt, supporting a set of image processing effects in both sequential and parallel modes.
- Implementation of the following graphic effects: negative, grayscale, sepia, blur, sharpening, and posterization [9].
- Testing the execution speed of all effects in parallel and sequential modes based on measurements of the execution time of all graphic effects.

The architecture of the developed software is based on an object-oriented approach and generally consists of a MainWindow window, which also includes other component elements.



**Fig. 1. Object diagram of the MainWindow window**

Let's take a closer look at the components of the program's interface that provide its functionality and ease of use. QMenuBar, located at the top of the window, is an important navigation element. This menu bar provides the user with access to the extended functionality of the program. It includes key options such as opening an image from disk for further editing, saving the processed image to disk, allowing you to save the results of your work. For the user's convenience, there are informative windows with data about the program itself and its author, which allows you to better understand the capabilities and origin of the software.



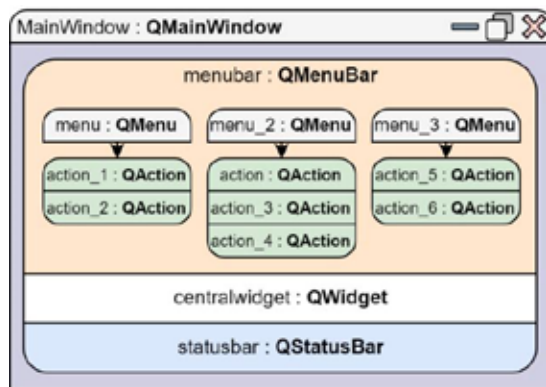


Fig. 2. Object diagram of the QMenuBar element

QcentralWidget is the heart of the program – this is the central area of the window where the main user interaction with the image takes place. It is here that uploaded files are displayed and further edited, making this component key to the functionality of the program. QstatusBar, located at the bottom of the interface, performs an important information function. This status bar is used to display various messages that inform the user about current processes and results of actions. In addition, it displays the execution time of operations, which allows you to evaluate the performance of the program and optimize image processing processes.

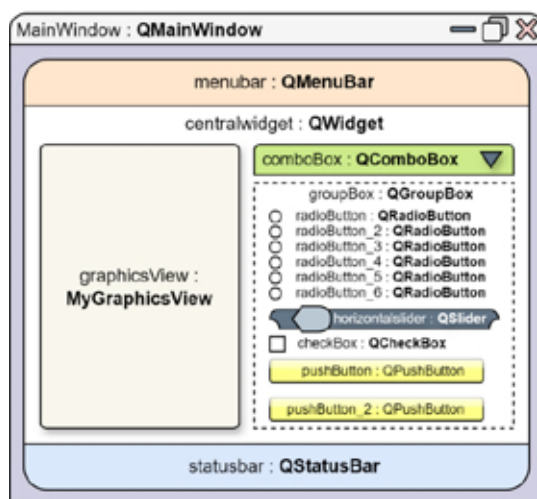


Fig. 3. Object diagram of the centralWidget element

The centralWidget area, which serves as the main workspace of the program, can be conditionally divided into two functional parts:

The first and largest part is QGraphicsView, which occupies most of the window. This component is controlled by a specially developed class MyGraphicsView, created to ensure correct image scaling when the size of the main MainWindow window changes. QGraphicsView is the key visualization element where the image loaded by the user is displayed. Here, the user can observe the changes occurring to the image in real time when applying various graphic effects, allowing for instant evaluation of the processing results.

The second part is QComboBox, which provides the ability to change the interface theme, switching between dark and light modes, improving user comfort in different lighting conditions [9]. There is also a QGroupBox, which combines the following elements, from top to bottom:

- QRadioButton – allows you to select a specific graphic effect to apply. It’s important to note that within a single QGroupBox, only one QRadioButton can be active at a time, preventing conflicts when selecting effects.
- QSlider – provides the ability to fine-tune the intensity of certain effects, such as Blur, Sharpen, and Posterize. This allows the user to achieve the desired level of image processing.
- QCheckBox – is responsible for activating the OpenMP technology, which allows for parallelizing computations, potentially accelerating image processing on multi-core systems.
- QPushButton – buttons used to apply effects to the image. Details:

- `pushButton` – the “Apply” button, which initiates the application of the selected graphic effect to the image, allowing you to see the processing result.
- `pushButton_2` – the “Reset” button, which allows you to undo the applied effect, returning the original image to `QGraphicsView`. This is useful for comparing processing results with the original image or if you need to start editing again.

The `QStatusBar`, located at the bottom of the window, completes the interface composition. This element performs an important informational function, displaying various messages about the program’s status and outputting the time spent on calculations and applying graphic effects. Such information helps the user evaluate the efficiency of different operations and optimize their workflow.

**Evaluation of parallelization efficiency:** To demonstrate and analyze the effectiveness of parallelization in the developed program, we will focus on the blur effect. This effect was chosen as a showcase example due to its high computational complexity, making it an ideal candidate for evaluating the benefits of parallel computing. The OpenMP method [10, 11] was used to implement parallelization, and its effectiveness was evaluated by comparing the execution time of the sequential and parallel versions of the algorithm.

Before delving into the details of the evaluation, it is worth considering the blur algorithm itself and its implementation. The blur effect is a widely used graphic technique that smoothes an image by blending the colors of neighboring pixels. This effect is often used to soften sharp edges, reduce noise in an image, or create a depth-of-field effect. Let’s consider a step-by-step algorithm for implementing this effect:

1. The process begins with loading the source image into the program. This can be an image of any common format (JPEG, PNG, BMP, etc.).

2. For the sake of uniform processing, the loaded image is converted to a single format – ARGB32. This format allocates 32 bits per pixel, with 8 bits for each of the channels: alpha (transparency), red, green, and blue. Such standardization simplifies further calculations and ensures predictable results.

3. At this stage, a weight is calculated for each pixel and its neighborhood using a Gaussian function. This function creates a “kernel” – a weight matrix that determines how strongly each neighboring pixel will affect the final result. The sum of all calculated weights is stored in the variable `sumTotal`. Then comes an important normalization step: each weight is divided by `sumTotal` to ensure that the sum of all weights is equal to 1. This guarantees that the overall brightness of the image remains unchanged after applying the effect.

4. Iterating over pixels and calculating new values. This phase is the most computationally intensive. The program sequentially processes each pixel of the image. For each pixel, the following actions are performed:

- New values are calculated for each color channel (red, green, blue) based on the weights of the Gaussian matrix and the values of neighboring pixels.
- This involves multiplying the color values of each neighboring pixel by the corresponding weight from the Gaussian matrix and then adding the results.
- The resulting values are rounded and limited to the range of 0-255 to ensure correct color.
- Finally, the new pixel with the calculated values is set in place of the original one.

5. After processing all pixels, the resulting blurred image is saved. It can be displayed to the user for viewing or saved to disk in the desired format.

This algorithm, especially its fourth step, is an ideal candidate for parallelization, as the processing of each pixel is an independent operation. That is why using OpenMP to parallelize these calculations can significantly improve the performance of the program, especially when processing large images or applying intensive blurring. Let’s move on to a direct consideration of the results of the comparisons.

For a thorough evaluation of the effectiveness of parallel image processing, a comprehensive study was conducted that included a series of carefully planned experiments. These experiments covered a wide range of conditions to ensure a comprehensive analysis of the performance of the developed software.

#### **Methodology:**

1. For testing, 24 images were selected, varying in size from the smallest (100x100 pixels) to extremely large (4000x4000 pixels). This range allowed us to evaluate the effectiveness of parallelization for different use cases.

2. Each graphic effect was applied to each image three times, both sequentially and in parallel mode. This ensured the statistical reliability of the results, minimizing the impact of random fluctuations in system performance.

3. For each experiment, the average execution time was calculated, which allowed us to obtain reliable performance indicators.

**Experimental results:** Analysis of the obtained data revealed a significant increase in performance when using OpenMP parallelization [10, 11], especially when processing large images. For example:

1. For the blur effect on a 4000x4000 pixel image, the parallel mode demonstrated an impressive speedup, being 3.5 times faster than the sequential one.

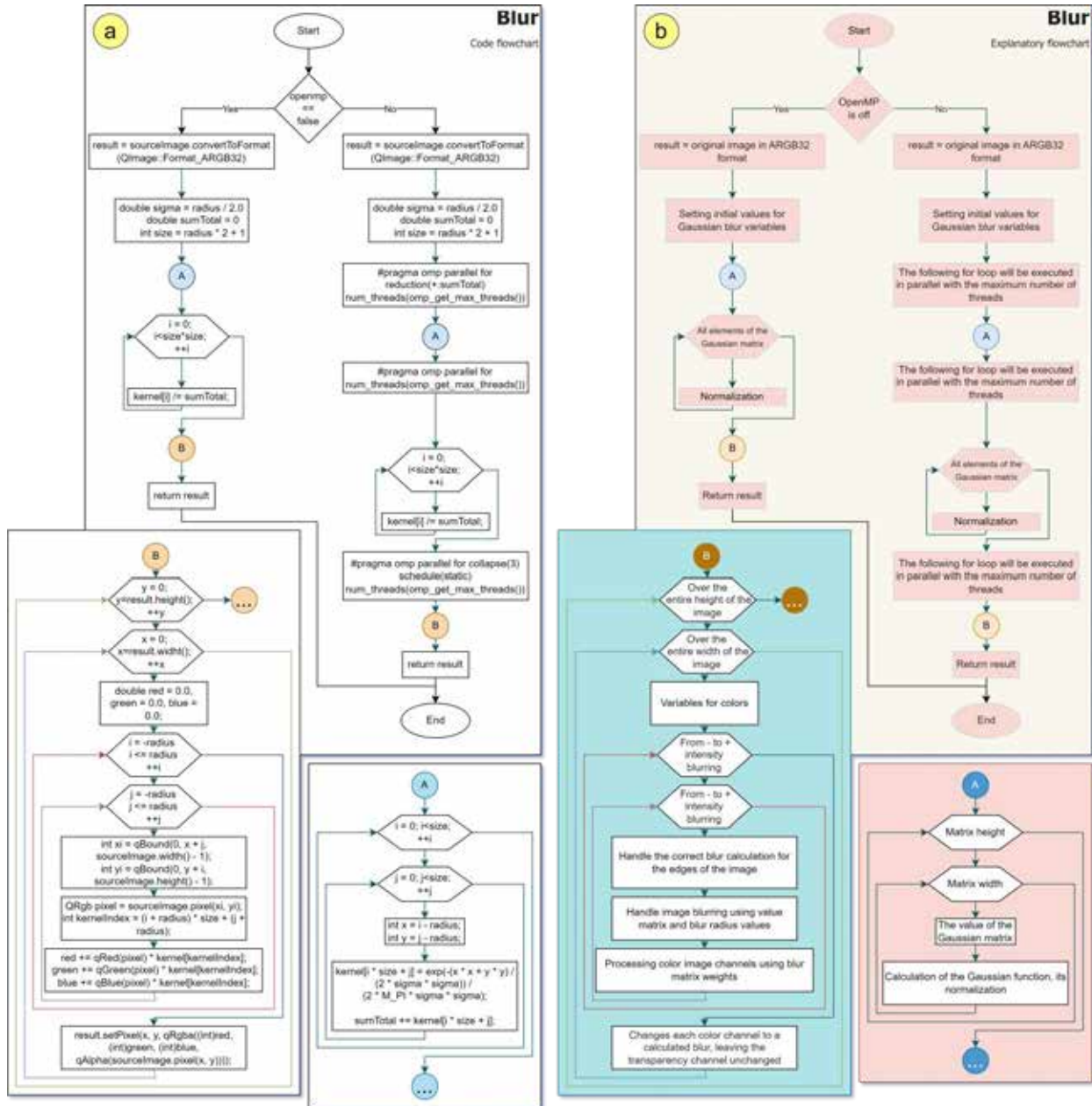


Fig. 4. Block diagram of the Blur effect execution (a); explanatory block diagram of the Blur effect execution (b)

2. Other effects also showed a significant improvement in performance, with a speedup of 2 to 4 times, depending on the algorithm complexity and image size.

Detailed analysis of the blur effect: This effect proved to be particularly indicative of the advantages of parallelization:

1. Even for the smallest images (100x100 pixels), an instant decrease in execution time was observed when using parallel mode.
2. The decrease in execution time ranged from 75% to 85% for most image sizes.
3. The maximum speedup (84%) was observed for images of size 1300x1300, 1400x1400, 1600x1600, 2000x2000, 3000x3000, and 4000x4000 pixels.
4. The lowest acceleration (55%) was recorded for images of size 400x400 pixels.
5. It is worth noting that the blur effect proved to be significantly more computationally intensive compared to simpler effects such as negative (Negative), grayscale (Grayscale), and sepia (Sepia). If for simple effects the execution time was measured in milliseconds, for Blur it was more appropriate to use seconds as a unit of measurement.

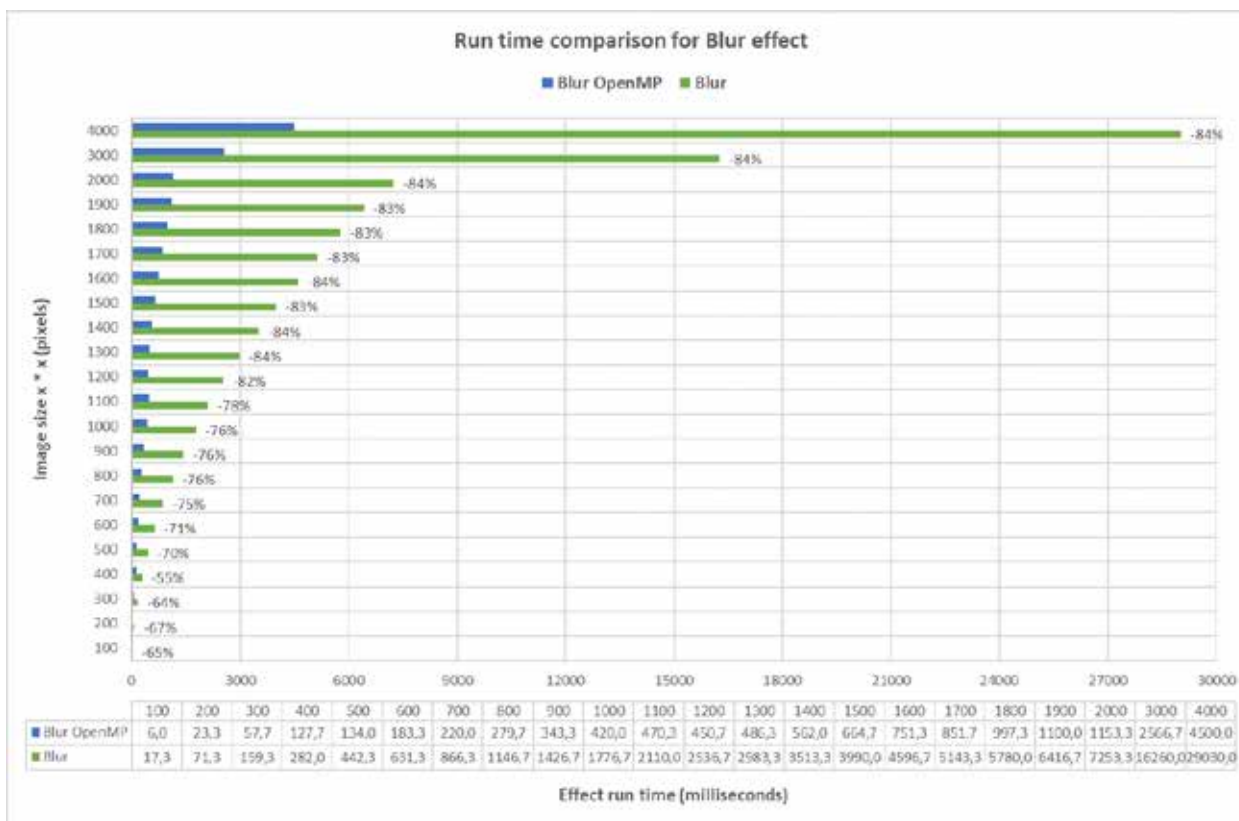


Fig. 5. Comparative diagram of execution time for the blur effect for sequential and parallel computation methods

**Conclusion**

1. The analysis of the obtained results allows us to draw several important conclusions regarding the effectiveness of applying parallel computations [11, 12] in image processing.

2. The effectiveness of parallelization demonstrates a clear positive correlation with the size of the processed image. This is explained by the fact that larger images provide more opportunities for distributing the computational load among threads.

3. For small images (up to 500x500 pixels), the difference between sequential and parallel modes may be less noticeable. This is due to the fact that the overhead of creating and synchronizing threads may exceed the gain from parallel processing for a relatively small amount of data.

4. Starting from a size of 1000x1000 pixels and above, the parallel mode demonstrates a significant acceleration. Depending on the specific effect and system characteristics, this acceleration can reach 2-4 times compared to the sequential mode.

5. More complex effects, such as blur, show the greatest gain from parallelization. This is explained by the fact that they provide more opportunities for distributing the computational load among threads.

6. The results demonstrate that parallel processing provides better scalability of the solution. With increasing image size and effect complexity, the relative gain from parallelization increases, making this approach particularly valuable for processing large amounts of data or complex graphic effects.

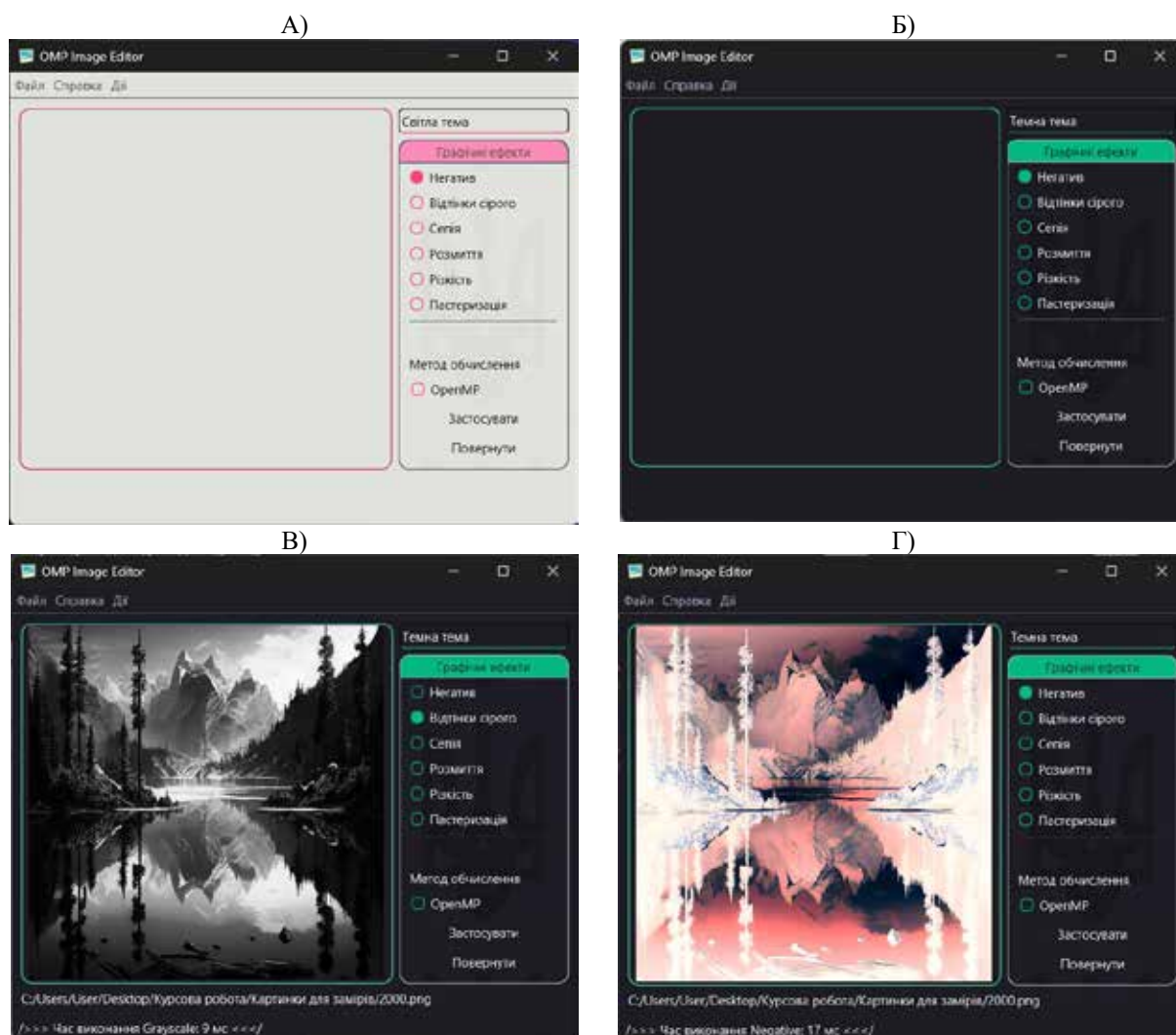
7. The use of parallel computations allows for more efficient use of available computing resources, especially on modern multi-core processors.

Thus, the conducted study convincingly demonstrates the significant advantages of applying parallel computations in image processing, especially for resource-intensive operations and large formats. This opens the way for the creation of more efficient and productive graphics applications capable of processing large volumes of visual data in less time.

The developed graphics editor with OpenMP support demonstrates the effectiveness of using parallel computations to accelerate the processing of digital images. The results of the experimental study confirm that using OpenMP can significantly improve the performance of software, especially when working with large images and resource-intensive graphic effects.

The obtained results have practical significance for the development of high-performance image processing software and can be used as a basis for further research in the field of optimizing graphics editors and other applications that

work with digital images. Further research can be directed towards optimizing algorithms for individual graphic effects, improving methods for balancing the load between threads, and adapting the developed approach to other platforms and architectures.



**Fig. 6. Interface of the developed program: A) light theme of the interface; B) dark theme of the interface; C) result of applying the grayscale effect; D) result of applying the negative effect.**

**References**

1. Ladkat, A. S., Date, A. A., & Inamdar, S. S. (2016, August). Development and comparison of serial and parallel image processing algorithms. In *2016 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*. Vol. 2, pp. 1-4. IEEE. DOI: 10.1109/INVENTIVE.2016.7824894.
2. S. W. Song (2002) Models for Parallel and Distributed Computation. *Applied Optimization*. Vol.67, pp. 147-178. DOI: 10.1007/978-1-4757-3609-0\_6.
3. Baumker, A., & Dittrich, W. (1996, April). Parallel algorithms for image processing: Practical algorithms with experiments. In *Proceedings of International Conference on Parallel Processing*. pp. 429-433. IEEE. DOI: 10.1109/IPPS.1996.508091
4. Haase, R., Royer, L. A., Steinbach, P., Schmidt, D., Dibrov, A., Schmidt, U., ... & Myers, E. W. (2020). CLIJ: GPU-accelerated image processing for everyone. *Nature methods*, 17(1), pp. 5-6. DOI: 10.1038/s41592-019-0650-1
5. Myers, B. A., McDaniel, R. G., & Kosbie, D. S. (1993, May). Marquise: Creating complete user interfaces by demonstration. In *Proceedings of the INTERACT'93 and CHI'93 Conference on Human Factors in Computing Systems*. pp. 293-300. DOI: 10.1145/169059.16922
6. Del Turco, R. R. (2012). After the editing is done: Designing a Graphic User Interface for digital editions. *Digital Medievalist*, 7. DOI: DOI:10.16995/DM.30

7. Blanchette, J., & Summerfield, M. (2019). C++ GUI Programming with Qt 5: Create Amazing Applications with Qt. 2nd., Publishing House of Electronics Industry. 464 p.
8. Stroustrup, B. (2018). A Tour of C++ (2nd Edition). Addison-Wesley. 180 p. ISBN 978-0-13-499783-4.
9. Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). Digital Image Processing (4th Edition). Pearson. 1168 p. ISBN 9780133356724.
10. Chapman, B., Jost, G., & Van Der Pas, R. (2008). Using OpenMP: Portable Shared Memory Parallel Programming. MIT Press. 384 p. ISBN: 9780262255905
11. Quinn, M. J. (2004). Parallel Programming in C with MPI and OpenMP. Dubuque, Iowa : McGraw-Hill Education, New York. 529 p.
12. Piccolino, M. (2018). “ Qt 5 Projects: Develop cross-platform applications with modern UIs using the powerful Qt framework. Packt Publishing. 360 p. ISBN 178829551X.

УДК 004.75:004.67

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.27>**М. О. ВОЛК**

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри електронних обчислювальних машин  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0000-0003-4229-9904

**А. М. БУГРІЙ**

кандидат технічних наук,  
старший викладач кафедри електронних обчислювальних машин  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0009-0002-9059-3200

**І. А. САМОЙЛОВ**

аспірант кафедри електронних обчислювальних машин  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0009-0000-2829-2744

**А. А. ФУРМАНОВ**

магістрант кафедри електронних обчислювальних машин  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0009-0005-0370-9829

**О. Ю. ЖУРАВЛЬОВ**

магістрант кафедри електронних обчислювальних машин  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0009-0005-5072-7245

**Д. М. ВОЛК**

студентка кафедри електронних обчислювальних машин  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0009-0008-1425-485X

## СИМУЛЯЦІЯ ТА УПРАВЛІННЯ ТУМАННИМИ ТА ОБЛАЧНИМИ ОБЧИСЛЕННЯМИ ДЛЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

В останні роки можна спостерігати значну еволюцію інформаційних технологій, зокрема перехід від окремих комп'ютерів та мереж до хмарних обчислень. Розвиток телекомунікаційних технологій, у тому числі і технології 5G дозволяє хмарним застосуванням мати доступ до значних обсягів даних. Великі дані, що обробляються хмарою, викликають необхідність наближати обчислювальні ресурси до кінцевого користувача. У статті представлено новий симулятор для туманних обчислень, який має назву FogGRASS. Його розроблено з метою підтримки процесів моделювання розподілених систем та управління обчислювальними ресурсами в розподілених обчислювальних мережах. Програма моделювання надає можливість гнучкої конфігурації мережі, підтримки мобільних та статичних пристроїв, керування обчислювальними ресурсами та мінімізації затримок. FogGRASS дозволяє моделювати різні сценарії та стратегії, включаючи конфігурацію вузлів, сховищ даних, параметри передачі даних та обчислювальні потужності. Проведені експерименти демонструють високу гнучкість, масштабованість, ефективне використання центрального процесора та пам'яті, а також зменшення затримки при виконанні задач з збільшенням навантаження в системі. Аналіз результатів моделювання показав високу ефективність і масштабованість при моделюванні великих мереж туманних вузлів: зі збільшенням кількості пристроїв система демонструвала стабільну роботу із використанням менше 25% ресурсу центрального процесора та 15% оперативної пам'яті. Це свідчить про здатність запропонованої системи ефективно працювати навіть у великих мережах. Окрім цього, було проведено тестування затримок виконання завдань при різних обсягах навантаження. Результати показали, що система здатна забезпечувати низькі затримки навіть при виконанні великих обчислювальних завдань. FogGRASS є перспективним інструментом для дослідників, які вивчають технології IoT та розподілені системи.

**Ключові слова:** хмарні обчислення, розподілені системи, туманні обчислення, моделювання, мережі, комп'ютерні ресурси, масштабування.

M. O. VOLK

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Professor at the Department of Electronic Computers  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
ORCID: 0000-0003-4229-9904

A. M. BUHRII

Candidate of Technical Sciences,  
Senior Lecturer at the Department of Electronic Computers  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
ORCID: 0009-0002-9059-3200

I. A. SAMOILOV

Postgraduate Student at the Department of Electronic Computers  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
ORCID: 0009-0000-2829-2744

I. A. FURMANOV

Master's Student at the Department of Electronic Computers  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
ORCID: 0009-0005-0370-9829

I. A. ZHURAVLYOV

Master's Student at the Department of Electronic Computers  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
ORCID: 0009-0005-5072-7245

D. M. VOLK

Student at the Department of Electronic Computers  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
ORCID: 0009-0008-1425-485X

## SIMULATION AND MANAGEMENT OF FOG AND CLOUD COMPUTING FOR THE INTERNET OF THINGS

*In recent years, one can observe a significant evolution of information technologies, in particular, the transition from individual computers and networks to cloud computing. The development of telecommunications technologies, including 5G technology, allows cloud applications to access significant amounts of data. Big data processed by the cloud creates a need to bring computing resources closer to the end user. The article presents a new simulator for fog computing called FogGRASS. It was developed to support the processes of modelling distributed systems and managing computing resources in distributed computing networks. The simulation program provides the possibility of flexible network configuration, support of mobile and static devices, management of computing resources and minimisation of delays. FogGRASS allows you to simulate different scenarios and strategies, including the configuration of nodes, data stores, data transmission parameters and computing power. The experiments that were conducted demonstrate high flexibility, scalability, efficient use of the central processor and memory, and a decrease in the delay when performing tasks with an increase in the load on the system. Analysis of the simulation results showed high efficiency and scalability when simulating large networks of fog nodes. With an increase in the number of devices, the system demonstrated stable operation using less than 25% of the CPU resource and 15% of the RAM. This indicates the ability of the proposed system to work effectively even in large networks. In addition, task performance delays at different workloads were tested. The results showed that the system can provide low delays even when performing large computing tasks. FogGRASS is a promising tool for researchers studying IoT technologies and distributed systems.*

**Key words:** cloud computing, distributed systems, fog computing, modelling, networks, computing resources, scaling.

### Постановка проблеми

Fog computing (туманні обчислення) є однією з нових парадигм хмарних систем, які пов'язані з периферійними обчисленнями [1]. У порівнянні з хмарними центрами обробки даних, fog computing забезпечує віртуалізоване обчислювальне середовище, що розгортається ближче до джерел даних або кінцевого користувача [2]. Тумані знаходяться між хмарою та пристроями кінцевого користувача. Хмара та туман надають подібні послуги кінцевим користувачам, але туман розгортається для сприяння певному географічному регіону для пришвидшення первинної обробки даних. Туман не може існувати автономно, він доповнює хмарні обчислення та розроблений для



підтримки програм, які чутливі до затримки виконання задач, тоді як хмара, що, як правило, знаходиться далеко від користувача, може демонструвати більшу затримку. Fog надає послуги для програм IoT як із комп'ютерної мережі, так і з таких пристроїв, як маршрутизатори, точки доступу та інші [3].

Туманні вузли сприяють надійності, відмовостійкості та масштабованості пристроїв, що також зменшує трафік між туманним вузлом і серверними хмарними центрами обробки даних.

Перебуваючи в стані розвитку, туманні обчислення не мають стандартів з точки зору строгої архітектури та платформ моделювання. На сьогодні доступно декілька симуляторів туманних систем, частина з яких є відкритими, але решта є комерційно доступними. Існуючі симулятори туманних обчислень в основному реалізують ряд пристроїв для моделювання. Як правило, існуючі симулятори більш схильні до конфігурацій датчиків, де датчики генерують необроблені дані, а вузли туману використовуються для обробки даних до надсилання у хмару або сховище даних. Подібні симулятори не мають можливості враховувати мережні параметри і передбачають, що середовище працює надійно і безпомилково. Ще недоліком таких симуляторів є відсутність можливості додавати власні алгоритми керування туманною системою.

Розглянемо деякі з часто використовуваних симуляторів, які можна використовувати для туманних систем. В [4] запропоновано DPWSim, розроблений для додатків IoT з підтримкою сервіс-орієнтованих моделей. В [5] описана система SimIoT, яка надає кілька механізмів зв'язку для датчиків IoT і хмарних центрів обробки даних. Існує розширення EdgeCloudSim системи CloudSim [6], яке модифікує хмарний симулятор для моделювання сценаріїв периферійних обчислень. Ще одно розширення CloudSim з використанням технології Java (iFogSim) запропоновано в [7], де реалізовано вплив методів управління ресурсами з точки зору затримки, перевантаження та вартості.

В [8] представлено мобільний симулятор IoT під назвою MobIoTSim, який надає дослідникам платформу для навчання роботі з пристроями Інтернету речей без покупки додаткових датчиків і пристроїв. SimpleIoTSimulator є широко використовуваним інструментом для моделювання середовища IoT за допомогою моделей датчиків і пристроїв. Він також підтримує низку специфічних протоколів IoT, таких як MQTT, CoA тощо. Аналогічно, IBM запропонувала симулятор IoT із підтримкою PaaS під назвою IBM Bluemix. Він надає веб-інтерфейс для швидкого розгортання хмарних програм, які можуть збирати дані з різних датчиків і пристроїв.

Фреймворк Google Cloud включає рішення Google IoT, яке надає різні сервіси Google [9]. Пропонований фреймворк має високу масштабованість і дозволяє використовувати велику кількість пристроїв, збирає дані та забезпечує платформу візуалізації.

Детальне порівняння існуючих симуляторів з запропонованим, показано у таблиці 1.

Таблиця 1

#### Порівняння існуючих систем моделювання туманних обчислень

Симулятори	Мережа	Відкритий код	Мобільні пристрої	Моделі користувача	План.	Споживання енергії
MobileFog	ні	ні	так	ні	ні	ні
Edge-Fog cloud	ні	так	обмеж.	ні	ні	ні
Cooja	ні	так	обмеж.	ні	ні	ні
EmuFog	так	так	ні	ні	ні	ні
RECAP	так	NA	ні	ні	ні	NA
FogTorch	ні	так	ні	ні	ні	ні
EdgeCloudSim	ні	так	ні	ні	так	ні
iFogSim	ні	ні	так	ні	так	ні
Google IoT Sim	ні	ні	так	ні	ні	ні
IBM BlueMax	ні	ні	так	ні	ні	ні
SimpleIoTSimulato	ні	ні	так	ні	ні	ні
MobIoTSim	ні	так	так	ні	ні	ні
FogGRASS	так	так	так	так	так	так

Більшість симуляторів, розглянутих вище, не є гнучкими, та не мають можливостей дослідникам включення власних моделей та алгоритмів планування. Крім того, існуючі симулятори в основному зосереджені на пристроях, які вони можуть підтримувати; однак мережеві протоколи та комунікаційний стек не враховуються повністю. Щоб перевірити та проаналізувати такі алгоритми, існує потреба в гнучкому, відкритому та швидкому в розгортанні симуляторі туманних обчислень.

#### Формулювання мети дослідження

Мета даної роботи полягає у підвищенні ефективності досліджень систем туманних обчислень шляхом створення середовища моделювання на базі існуючої системи GRASS [10], яке на відміну від існуючих дозволяє врахувати моделі мережі, мобільних пристроїв, користувачів та алгоритми планування і оцінки енергоспоживання.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

FogGRASS розроблено як розширення системи імітаційного моделювання розподілених хмарних обчислень GRASS [10]. GRASS – інструмент із відкритим вихідним кодом, який надає бібліотеки для моделювання характеристик GRID систем. Він надає низку вбудованих модулів, які діють як реалістичні мережеві пристрої, брокери ресурсів та інше. На рисунку 1 показано дизайн запропонованого фрейворку FogGRASS. У FogGRASS можна легко інтегрувати всі доступні модулі GRASS.



**Рис. 1. Структура фрейворка FogGRASS**

Дослідники можуть легко модифікувати модулі FogGRASS для моделювання своїх сценаріїв. Основна мета розробки FogGRASS полягає в тому, що існуючі фреймворки розроблені для підтримки різних датчиків. Однак вони не враховують такі характеристики мережі, як частота помилок і швидкість передачі даних, які можуть відігравати вирішальну роль у моделюванні програм, чутливих до затримок. Основними модулями FogGRASS є брокер, туманний вузол і кінцеві пристрої. Брокер – це централізований менеджер ресурсів, який відстежує всі туманні вузли. Туманний вузол надає послугу обчислень. Кінцевий пристрій – це фактичний вузол/датчик, який може рухатися під час зв’язку та генерувати запити для обчислювальних вузлів. Вузол-посередник отримує запит від пристроїв на виконання запитуваного обчислення. Вузол посередника підтримує чергу, звідки запити обслуговуються за принципом «першим прийшов – першим обслужено». Таким чином, брокер відповідає за планування, виконання та передачу завдань.

FogGRASS забезпечує гнучкість конфігурації мережі. Користувач може визначати параметри мережі відповідно до своїх проектних вимог. Таким чином, можна змоделювати більш реалістичну мережу. FogGRASS містить низку протоколів зв’язку, які можна використовувати для моделювання різноманітних сценаріїв. Наразі доступними протоколами є TCP, UDP, FTP, HTTP, MQTT, CoAP і AMPQ. HTTP, TCP і UDP також можна використовувати для зв’язку з центром обробки даних. FogGRASS підтримує різноманітні пристрої та туманні вузли зі змінною кількістю додатків, які можуть виконуватися на кожному вузлі одночасно.

FogGRASS пропонує можливість моделювання реальних мереж, що дозволяє дослідникам налаштовувати параметри мережевої інфраструктури, включаючи топологію, швидкість передачі даних, затримки, частоту помилок та інші важливі характеристики. Симулятор підтримує як дротові, так і бездротові мережі, що дає змогу відтворювати реальні сценарії використання туманних обчислень у розподілених мережах.

Однією з ключових функцій системи є можливість підтримки **передачі завдань** між туманними вузлами, що особливо важливо в сценаріях з високою мобільністю. Якщо вузол туману не може обробити новий запит через перевантаження або недостатні ресурси, брокер передає завдання на сусідні вузли, що дозволяє мінімізувати затримки та забезпечувати безперервність виконання завдань.

FogGRASS надає широкі можливості для моделювання обчислювальних завдань, що дозволяє ефективно тестувати різні сценарії використання обчислювальних ресурсів. Важливою особливістю є підтримка завдань різного розміру та складності, від малих до великих, що дає змогу моделювати реальні умови використання систем IoT і розподілених обчислень. Наприклад, малим завданням можуть бути запити на обробку даних від датчиків, що генерують невеликі обсяги інформації, тоді як великі завдання можуть вимагати значної обчислювальної потужності для аналізу відео або інших складних обчислень.

Для оцінки продуктивності симулятора був змодельований сценарій комунікаційної мережі з системою керування трафіком для туманних вузлів, де розгортається кілька статичних датчиків для збору інформації. Дані обробляються на туманних вузлах. Крім того, є користувачі, які підписалися на ці датчики залежно від їхнього географічного розташування. Користувачі також можуть генерувати запит на обчислювальні ресурси для здійснення пошуку чи прогнозування. Датчик генерує дані через рівні проміжки часу. Вузол-посередник отримує дані та передає їх на вузол fog для обробки, а результати розповсюджуються на фіксовані пристрої. Крім того, пристрої можуть надсилати запит на обчислювальну потужність вузлу-посереднику. Посередник призначає ресурси на основі політики планування та після виконання надсилає результат на запитаний пристрій. Під час виконання завдання брокер також відстежує запитані або підписані пристрої для операцій передачі.

Масштабованість FogGRASS вимірюється з точки зору використання пам'яті та ЦП. Тому, оскільки IoT складається з великої кількості пристроїв, важливо порівняти запропонований FogGRASS з точки зору використання пам'яті та ЦП. Затримка вимірюється щодо завдання виконання. Завдання поділяються на великі (1500 MIPS), середні (900 MIPS), малі (200 MIPS) і випадкові (випадкове число від 200 до 1500 MIPS). Зазвичай різні функції вимагають різної обчислювальної потужності. Наприклад, у системі керування трафіком ідентифікація об'єктів із моментального знімка або прогнозування руху групи можуть займати різний час виконання.

Експериментальна оцінка (рис. 2) показала, що FogGRASS демонструє високу ефективність і масштабованість при моделюванні великих мереж туманних вузлів. Зі збільшенням кількості пристроїв до 1300 система демонструвала стабільну роботу із використанням менше 35% центрального процесора та 25% оперативної пам'яті, що свідчить про її здатність ефективно працювати навіть у великих мережах.



Рис. 2. Використання ресурсів системою FogGRASS залежно від кількості вузлів

Окрім цього, було проведено тестування затримок виконання завдань при різних обсягах навантаження. Результати показали, що система здатна забезпечувати низькі затримки навіть при виконанні великих обчислювальних завдань. Важливим аспектом було також тестування частоти помилок у бездротових мережах, де система показала високу надійність.

### Висновки

У роботі запропоновано симулятор FogGRASS, який є потужним інструментом для моделювання туманних обчислень. FogGRASS дозволяє дослідникам інтегрувати власні алгоритми планування ресурсів, моделювати різні типи мереж, включаючи мобільні пристрої та статичні вузли. У порівнянні з існуючими симуляторами, FogGRASS надає більшу гнучкість у налаштуванні параметрів мережі та враховує важливі аспекти, такі як частота помилок, затримка передачі даних та енергоспоживання [11].

У майбутньому планується розширити можливості симулятора, включивши підтримку міграції віртуальних машин та сумісність між різними туманними мережами. Це відкриє нові можливості для дослідників у галузі розподілених обчислювальних систем, дозволяючи тестувати більш складні сценарії та оптимізувати використання ресурсів у туманних обчисленнях. FogGRASS також надає можливості для дослідження нових алгоритмів управління мобільними пристроями та розподілу обчислень в умовах обмежених ресурсів.

**Список використаної літератури**

1. Shi, Dustdar S. The promise of edge computing. *Computer*, vol. 49, no. 5, pp. 78–81, 2016.
2. Bonomi F., Milito R., Zhu J., Addepalli S. “Fog computing and its role in the internet of things,” in Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing. ACM, 2012, pp. 13–16.
3. Bellavista P., Foschini L., Scotece D. Converging mobile edge computing, fog computing, and IoT quality requirements. *Future Internet of Things and Cloud (FiCloud)*, 2017 IEEE 5th International Conference on. IEEE, 2017, pp. 313–320.
4. Han S. N., Lee G. M., Crespi N., Van Luong N., Heo K., Brut M., Gatellier P. DPWSim: A simulation toolkit for IoT applications using devices profile for web services. *Internet of Things. 2014 IEEE World Forum on. IEEE*, 2014, pp. 544–547.
5. Sotiriadis S., Bessis N., Asimakopoulou E., Mustafee N. Towards simulating the Internet of things. *Advanced Information Networking and Applications Workshops*, 2014 28th International Conf on IEEE, 2014, pp. 444–448.
6. Sonmez C., Ozgovde A., Ersoy C. Edgecloudsim: An environment for performance evaluation of edge computing systems. *Fog and Mobile Edge Computing. 2017 Second International Conference on IEEE*, 2017, pp. 39–44.
7. Gupta H., Vahid Dastjerdi A., Ghosh S. K., Buyya R. iFogSim: A toolkit for modelling and simulation of resource management techniques in the internet of things, edge and fog computing environments. *Software: Practice and Experience*, vol. 47, no. 9, pp. 1275–1296, 2017. DOI:10.1002/spe.2509
8. Pflanzner T., Kertész A., Spinnewyn B., Latr'e S. MobIoTSim: towards a mobile iot device simulator. 2016 IEEE 4th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (Fi- CloudW). IEEE, 2016, pp. 21–27.
9. Google cloud platform. <https://cloud.google.com/iot-core/>, accessed: 23.09.2024.
10. Filimonchuk T., Volk M., Ruban I., Tkachov V. Development of information technology of tasks distribution for grid-systems using the GRASS simulation environment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 3/9 (81). pp. 45–53. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71892
11. Mamchych O., Volk M. A unified model and method for forecasting energy consumption in distributed computing systems based on stationary and mobile devices. *Radioelectronic and Computer Systems, [S.I.]*, v. 2024, n. 2, p. 120–135. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2024.2.10>.

**References**

1. Shi, Dustdar, S. (2016) The promise of edge computing. *Computer*, vol. 49, no. 5, pp. 78–81.
2. Bonomi, F., Milito, R., Zhu, J., Addepalli, S. (2012) “Fog computing and its role in the internet of things,” in Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing. ACM, pp. 13–16.
3. Bellavista, P., Foschini, L., Scotece, D. (2017) Converging mobile edge computing, fog computing, and IoT quality requirements. *Future Internet of Things and Cloud*. 2017 IEEE 5th International Conference on. IEEE, pp. 313–320.
4. Han, S., N., Lee, G., M., Crespi, N., Van Luong, N., Heo, K., Brut, M., Gatellier P. (2014) DPWSim: A simulation toolkit for IoT applications using devices profile for web services. *Internet of Things (WF-IoT)*, 2014 IEEE World Forum on. IEEE, pp. 544–547.
5. Sotiriadis, S., Bessis, N., Asimakopoulou, E., Mustafee, N. (2014) Towards simulating the Internet of things. *Advanced Information Networking and Applications Workshops*, 2014 28th International Conf on IEEE, pp. 444–448.
6. Sonmez, C., Ozgovde, A., Ersoy, C. (2017) Edgecloudsim: An environment for performance evaluation of edge computing systems. *Fog and Mobile Edge Computing. 2017 Second International Conference on IEEE*, pp. 39–44.
7. Gupta H., Vahid Dastjerdi A., Ghosh S. K., Buyya R. (2017) iFogSim: A toolkit for modelling and simulation of resource management techniques in the internet of things, edge and fog computing environments. *Software: Practice and Experience*, vol. 47, no. 9, pp. 1275–1296. DOI:10.1002/spe.2509
8. Pflanzner, T., Kertész, A., Spinnewyn, B., Latr'e, S. (2016) MobIoTSim: towards a mobile iot device simulator. 2016 IEEE 4th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops. IEEE, pp. 21–27.
9. Google cloud platform. <https://cloud.google.com/iot-core/>, accessed: 23.09.2024.
10. Filimonchuk, T., Volk, M., Ruban, I., Tkachov, V. (2016) Development of information technology of tasks distribution for grid-systems using the GRASS simulation environment. *Information and controlling system*, Vol. 3/9 (81). pp. 45–53. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71892
11. Mamchych, O., Volk, M. (2024) A unified model and method for forecasting energy consumption in distributed computing systems based on stationary and mobile devices. *Radioelectronic and Computer Systems, [S.I.]*, n. 2, p. 120–135. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2024.2.10>.

**V. M. KOZEL**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Computer Systems and Networks  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0002-2627-2499

**IE. A. DROZDOVA**

Senior Lecturer at the Department of Computer Systems and Networks  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0003-0276-6387

**O. I. IVANCHUK**

Postgraduate Student at the Department of Computer Systems and Networks  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0002-2058-4707

**O. O. PRYKHODKO**

Senior Lecturer at the Department of Specialized Translation  
and Foreign Languages  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0002-8732-3659

## RESEARCH OF PENETRATION TESTING METHODS

*The article examines penetration testing methods as a vital tool for identifying vulnerabilities in modern information systems and networks. The attention is drawn to improving security in the face of a growing number of cyberattacks and analyzing ethical hacking to prevent intruders' threats. An overview of the main approaches to penetration testing, such as Black Box, White Box, and Gray Box, is provided. Each method assesses system security at different levels, depending on the information available about the network under test.*

*The classification of penetration testing by the tested aspects, such as testing of applications, networks, physical systems, and social engineering methods, is considered. The authors emphasize that web applications require special attention, as they are the main target of many attacks.*

*The article also presents a systematic approach to penetration testing, which includes six main stages: planning, information gathering, vulnerability detection, penetration attempt, analysis and reporting, and cleanup. The authors emphasize the importance of each stage for effectively protecting information resources and ensuring their resilience to attacks.*

*The article provides an overview of popular penetration testing tools, such as Kali Linux, Metasploit, Nmap, and Wireshark, and analyzes their application at different stages of the pentest. The international security standards used to develop a penetration testing methodology are discussed.*

*The conclusions emphasize the importance of penetration testing to identify and eliminate vulnerabilities in information systems. The authors note that effective penetration testing requires the professional skills of ethical hackers who can use the same methods as attackers but aim to strengthen system security.*

**Key words:** security, security testing tools, penetration testing, cybersecurity.

**В. М. КОЗЕЛ**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-2627-2499

**Є. А. ДРОЗДОВА**

старший викладач кафедри комп'ютерних систем та мереж  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0003-0276-6387

О. І. ІВАНЧУК

аспірант кафедри комп'ютерних систем та мереж  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-2058-4707

О. О. ПРИХОДЬКО

старший викладач кафедри галузевого перекладу та іноземних мов  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-8732-3659

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ТЕСТУВАННЯ НА ПРОНИКНЕННЯ

У статті детально досліджуються методи тестування на проникнення як ключового інструменту для виявлення вразливостей у сучасних інформаційних системах та мережах. Автори звертають увагу на важливість покращення безпеки в умовах зростаючої кількості кібератак та аналізують етичний хакінг як метод запобігання загрозам з боку зловмисників. У статті подано огляд основних підходів до тестування на проникнення, таких як Black Box (тестування «чорного ящика»), White Box (тестування «білого ящика») та Gray Box (тестування «сірого ящика»). Кожен із цих методів використовується для оцінки безпеки системи на різних рівнях, залежно від кількості доступної інформації про мережу, що тестується.

Розглянуто також класифікацію тестування на проникнення за аспектами, що перевіряються: тестування додатків, мереж, фізичних систем та методів соціальної інженерії. Автори підкреслюють, що особливій уваги потребують веб-додатки, оскільки вони є основною ціллю багатьох атак.

У статті також наведено системний підхід до тестування на проникнення, який включає шість основних етапів: планування, збір інформації, виявлення вразливостей, спроба проникнення, аналіз і звітність, а також очищення. Автори наголошують на важливості кожного з цих етапів для ефективного захисту інформаційних ресурсів та забезпечення їх стійкості до атак.

Стаття містить огляд популярних інструментів для проведення тестування на проникнення, таких як Kali Linux, Metasploit, Nmap та Wireshark, і аналізує їх застосування на різних етапах пентесту. Також розглянуто міжнародні стандарти безпеки, які можуть бути використані як основа для розробки методології тестування на проникнення.

Висновки підкреслюють важливість використання тестування на проникнення для виявлення та усунення вразливостей у інформаційних системах. Автори зазначають, що ефективне тестування на проникнення потребує професійних навичок етичних хакерів, які здатні використовувати ті ж самі методи, що й зловмисники, проте з метою зміцнення безпеки систем.

**Ключові слова:** безпека, засоби тестування безпеки, тестування на проникнення, кібербезпека.

### Problem statement

Today, Internet security requires significant improvement. Breaking into a system, or hacking, is an activity in which an attacker exploits the weakness in a system for personal benefit or pleasure. Those who engage in hacking are called hackers, crackers, or intruders. Their goals can range from entertainment and profit to disrupting the activities of others and gaining recognition. However, they all have a common goal: to find and exploit vulnerabilities in a system. As public and private organizations move more and more of their critical functions, such as e-commerce, marketing, and database access to the Internet, attackers have more opportunities to obtain confidential information through web applications. Therefore, protecting systems from hacker attacks is becoming critical.

Ethical hacking aims to identify and eliminate system weaknesses and vulnerabilities. It is a moral process aimed at improving network security.

### Research publications

Although few studies have been devoted to security testing tools, researchers focus on testing and analyzing potential software vulnerabilities. The research [1] analyzed several technical articles published from 2005 to 2020 on web application security testing. Paper [2] identifies the problems faced by developers and users of web applications. Studies [3, 4] compare the results of automated and manual testing, emphasizing the importance of manual testing to identify specific vulnerabilities that can only be detected with the help of specialist experience. The analysis confirmed the importance of finding practical tools to minimize the risks and vulnerabilities of websites.

### Research objective

This study aims to investigate possible vulnerabilities and threats currently the most common in the field of information security, as well as to develop methods of protection against them.

The relevance of this study is related to the need to ensure the security and resilience to vulnerabilities of modern computing systems and the Internet in various areas of organizations' activities. Whether it is a business organization, government agency, educational institution, or even a medical facility, it is essential to be confident in their information security.

**The main material**

Penetration testing is a systematic process of checking hardware and software that forms a complex data storage and transmission network. It allows you to assess network security by simulating actual attacks and exploits. This method makes it possible to investigate the weaknesses of any organization’s security system in detail [5].

Penetration testing is a simulation of an attack on a system, network, equipment, or other object to assess its vulnerability to actual attacks. This process is performed by an ethical hacker who acts with the system owner’s permission. Simply put, it is a procedural security audit of a network or application.

Ethical hackers and attackers are different and play different roles in the security sphere. Ethical hackers use the same tools and techniques as attackers but do not damage systems or steal information. Instead, they assess the level of security, notify owners of the identified vulnerabilities, and give recommendations on how to eliminate them. Thus, penetration testing can be classified into three categories depending on the hacker’s “hat color.”

“White” hackers are authorized professionals who work for a company with good intentions and high moral standards.

“Black” hackers, on the other hand, aim to harm computer systems and networks. They act solely in their interests and for profit. They are also called “crackers,” “malicious hackers,” or “intruders.”

“Gray” hackers combine the features of both white and black hackers. They may act for ethical reasons.

Penetration testing can be classified into three types according to the approach used [8]:

- 1) Black Box.
- 2) White Box.
- 3) Gray Box.

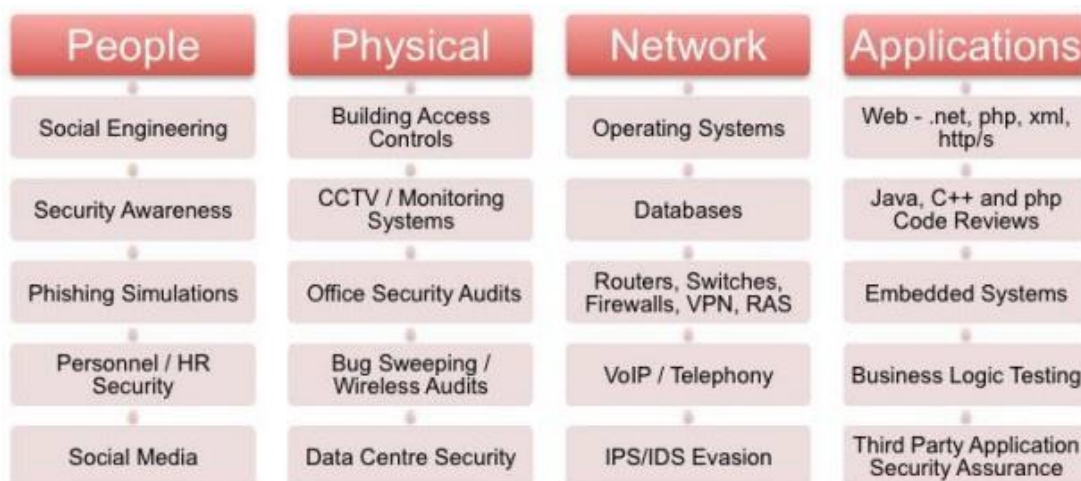
Black Box is the most practical attack performed by the pentester without any prior information about the target system. It is the most effective way to evaluate a security system because it simulates attacks. The pentester does not have access to any information about the network, including its structure, hardware types, or applications used. He must learn the target system from scratch to achieve the desired result. This type of testing aims to simulate an actual cyber attack fully.

White Box is a formalized testing approach where the pentester has basic information about the target infrastructure, including network structure, IP addresses, and other essential details. With basic knowledge of the target network, the pentester can work more focused on identifying and fixing vulnerabilities. This type of testing is usually done in close collaboration with the organization, and its goal is to help create a robust security system.

Gray Box is a combination of black box and white box approaches. The pentester has limited information about the target system, such as the server’s IP address or the application’s source code. This method is less popular but allows you to test the system partially inside and outside. The pentester can simulate an attacker’s actions to check the system’s reliability with available information.

Types of penetration testing.

Penetration testing types can be divided into four categories depending on which security aspects they assess, as shown in Figure 1 [9, 10, 11].



**Fig. 1. Classification of penetration testing**

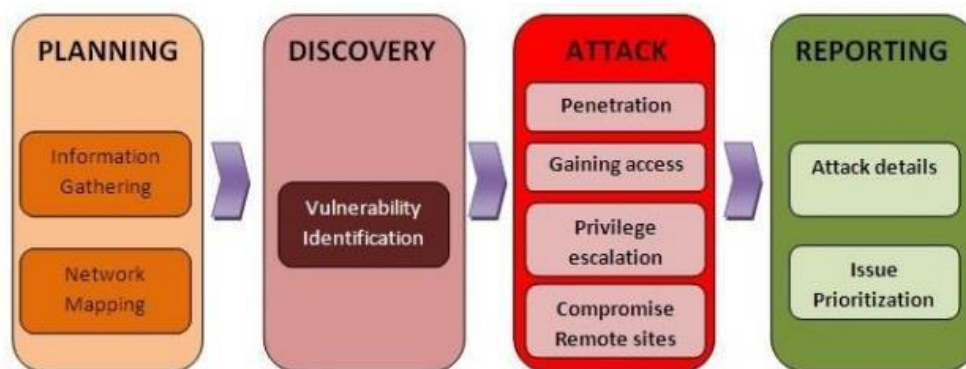
1) Application penetration testing focuses on identifying application vulnerabilities related to data monitoring and fire-wall security issues. Web applications, especially those based on a client-server architecture and transmitting information

over a network, can have critical vulnerabilities that are dangerous to the target system. Many modern web applications have vulnerabilities that have yet to be addressed. This testing covers all these aspects to ensure network security.

2) Network penetration testing is one of the key elements in conducting a pentest in an organization. Depending on the organization's size, the physical network may have security gaps that often go unnoticed during setup. To ensure a secure network, penetration testing is performed on devices such as routers, switches, modems, and hubs to identify possible vulnerabilities. It is a process in which a pentester ethically attacks an organization's network to find weaknesses and eliminate them using exploits.

3) Penetration testing of physical systems focuses on checking physical security. Vulnerabilities in this category relate to unauthorized physical access to target machines in the organization. Authentication and restricted access are thoroughly inspected during physical testing. This method is essential because it allows you to gather information about the target system directly through physical presence on the network. It aims to improve the effectiveness of physical systems' authentication, authorization, and access control.

4) Social engineering penetration testing aims to assess vulnerabilities related to the human factor. The basic information for such attacks can be obtained through search engines such as Google or social networks such as Facebook and X (Twitter), where a large amount of personal information is shared. In addition, public meetings and communication with people are significant weaknesses attackers can exploit. This penetration testing type helps assess the risk of unauthorized access to confidential information.



**Fig. 2. The main steps of penetration testing**

Use of a systematic approach.

The systematic approach to penetration testing consists of six stages (Figure 2) that ensure efficiency and a comprehensive system security assessment. These stages integrate a step-by-step methodology that every penetration tester must follow.

1) Planning and preparation.

This stage is the starting point for any penetration testing. It includes planning, preparation, and agreement between the organization's owners and testers on the objectives of the test, the methods used, and the expected results. The penetration tester familiarizes himself with the target system, determines a strategy to maximize the exploitation of vulnerabilities, and provides recommendations for their elimination. Privacy policies, timeframes, and schedules are also discussed.

2) Collection and analysis of information.

In this stage, known as "reconnaissance," information about the target system is gathered. The tester sets up a platform to collect information about the organization's network and applications using online sources such as websites, social networks, or special Linux-based tools. This stage is divided into two types:

- Passive information gathering: involves searching for information on the Internet without directly interacting with the target organization.

- Active information gathering: involves direct interaction with the system, such as receiving banners that may reveal more information.

Tools like Google Hacking or Shodan can help gather information about target systems.

3) Identification of vulnerabilities.

This stage, known as scanning, involves using various tools to find vulnerabilities based on the information collected. The pentester analyzes operating systems, applications, and network components to identify possible attack points. Scanning is divided into three categories:

- Network scan: aims to detect all hosts on the network, obtaining information about their IP addresses, operating systems, and servers.

- Port scanning: helps to identify open ports on specific hosts that can be used for an attack.



– Vulnerability scanning: Scans for possible operating system, applications, or network services vulnerabilities.

4) Penetration attempt.

At this stage, the pentester uses the collected data and prepared exploits to test the vulnerabilities found during the scan. It sends exploits accompanied by payloads, which allows you to exploit the vulnerability of the target system successfully. It will enable you to assess the organization’s security level and show how well the system can withstand an attack.

5) Analysis and reporting.

This stage involves the preparation of detailed documentation of the work performed. The report should describe all the methods and procedures used for testing, including an assessment of the system’s security level. It helps the organization understand where the vulnerabilities are and how to eliminate them. The report is also a reference for future audits and can be used at the information-gathering stage.

6) Cleaning.

After the test, the pentester removes all traces of its presence on the system to ensure the network is clean and secure. It includes undoing all settings and changes made during the test so that the organization can ensure no vulnerabilities or settings are left active. Properly executing this step is essential to ensure system security and prevent possible attacks.

This methodology allows for deep and comprehensive penetration testing, ensuring maximum efficiency in identifying and eliminating system vulnerabilities.

Many tools are on the market to help pentesters and system administrators test and build a secure network to protect against attacks. Most of these tools are free and open source, designed for ethical hacking. Depending on the penetration testing stage, scanners, test platforms, vulnerability detection tools, etc., can be used [12, 13, 15]. Some popular tools are listed in Table 1.

Table 1

**Penetration testing tools**

№	Instrument	Type
1	Brutus	Password selecting tool
2	Dradis	Scanning report program
3	Dnstuff	Network Utility
4	Hydra	Password guessing tool
5	Hping	Network Utility
6	John the Ripper	Password recovery tool
7	Kali Linux	Linux OS
8	Metasploitable	Virtual machine for penetration testing
9	Metasploit	Exploit testing tool
10	Maltego	Network visualizer
11	Nmap	Network scanner
12	Netcraft	Website scanner
13	Nessus	Vulnerability scanner
14	Netcat	Network Utility
15	Python	Programming language
16	Scapy	Network Utility
17	Ubuntu	Linux OS
18	Wireshark	Traffic analyzer

In addition to tools, there are various standards that pentesters rely on to assess system security. Some of the most commonly used standards are shown in Table 2.

Table 2

**Standards for security assessment**

Abbreviation	Name
WASC	Web Application Security Consortium
OSSTMM	Open Source Security Testing Methodology Manual
OWASP	Open Web Application Security Project
ISSAF	Information Systems Security Assessment Framework
NIST	National Institute of Standards and Technology

The most common vulnerabilities described in these standards:

– SQL injection;

- Hidden backdoors;
- Cross-Site Scripting;
- Cross-Site Request Forgery;
- Command Injection;
- Bypassing Authentication.

Many network security companies hire pentesters based on their ability to exploit these vulnerabilities.

### Conclusions

Penetration testing is a versatile tool for finding weaknesses in a system because it uses the same methods as real attackers. Identifying these weaknesses is insufficient; the next step is appropriately hardening the system. An essential part of the process is to have the system tested by a professional and experienced ethical hacker.

The debate between ethical (white) and malicious (black) hackers is a long-running war with no end. White hackers help companies understand their security needs, while black hackers illegally intrude and harm organizations for personal gain.

A wealth of information and software is available for penetration testing, some of which are presented in this article. Penetration testing is a comprehensive component of information technology. Vulnerabilities can be in any system part: software, hardware, code, or system architecture. Therefore, when it comes to security, modern security methods, including ethical hacking, must be addressed.

Considering this, many professionals believe that familiarizing yourself with the basics of penetration testing is highly beneficial in terms of technological knowledge and general awareness.

### Bibliography

1. Aydos, M., Aldan, Ç., Coşkun, E., Soydan, A. Security testing of web applications: A systematic mapping of the literature. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*. 2022. № 34(9), Pp. 6775-6792. DOI: 10.1016/j.jksuci.2021.09.018.
2. Mubshra, Q., Shahid, F., Mohd, H., Nizam, B., Md, N., Atif, A. A Rigorous Approach to Prioritizing Challenges of Web-Based Application Systems. *Malaysian Journal of Computer Science*. № 34. 2021 DOI: 10.22452/mjcs.vol34no2.1.
3. Dukes, L., Yuan, X., Akowuah, F. A case study on web application security testing with tools and manual testing. *Proceedings of IEEE Southeastcon-2013*. 2013. Pp. 1-6. DOI: 10.1109/SECON.2013.6567420.
4. Shahid, J., Hameed, M., Javed, I., Qureshi, K., Ali, M., Crespi, N. (). A Comparative Study of Web Application Security Parameters: Current Trends and Future Directions. *Applied Sciences*. 2022 № 12. P. 4077. DOI: 10.3390/app12084077.
5. Тест на проникнення – Wikipedia 2024. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%81%D1%82\\_%D0%BD%D0%B0\\_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%81%D1%82_%D0%BD%D0%B0_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F)
6. Ric Messier. *Penetration Testing Basics: A Quick-Start Guide to Breaking into Systems* : Apress. 2016. 115 p.
7. ДСТУ ISO/IEC TS 27008:2019 (ISO/IEC TS 27008:2019, IDT) Інформаційні технології. Методи захисту.
8. Закон України “Про захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах № 26 від 2005 р.” URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2594-15>.
9. Top 5 Penetration Testing Methodologies and Standards URL: <https://www.getastra.com/blog/security-audit/penetration-testing-methodology/#>.
10. Oriyano Sean-Philip. *Penetration Testing Essentials*. Sybex, a Wiley brand. 2017. 363 p.
11. Baloch Rafay. *Ethical hacking and penetration testing guide*. Auerbach Publications. 2017. 523 p.
12. Wilhelm, Thomas. *Professional penetration testing: Creating and learning in a hacking lab*. Newnes. 2013. 525 p.
13. BSI – Study A Penetration Testing Model. Federal Office for Information Security, 111 p. URL: [https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Publications/Studies/Penetration/penetration\\_pdf.html](https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Publications/Studies/Penetration/penetration_pdf.html)
14. Gilberto Najera-Gutierrez, Juned Ahmed Ansari. *Web Penetration Testing with Kali Linux: Explore the methods and tools of ethical hacking with Kali Linux*. Packt Publishing Ltd. 2018.
15. Johansen, Gerard. *Kali Linux 2–Assuring Security by Penetration Testing* : Packt Publishing Ltd. 2016.
16. Cameron Buchanan, Vivek Ramachandran. *Kali Linux Wireless Penetration Testing Beginner’s Guide: Master wireless testing techniques to survey and attack wireless networks with Kali Linux, including the KRACK attack* : Packt Publishing Ltd. 2017.
17. Matthew Denis, Carlos Zena, Thaier Hayajneh. *Penetration testing: Concepts, attack methods, and defense strategies*. *IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT)*. IEEE. 2016.
18. Georgia Weidman *Penetration Testing – A hand on introduction to hacking*. San Francisco. 2014
19. Ge Chu, Alexei Lisitsa. *Penetration Testing for Internet of Things and Its Automation*. *2018 IEEE 20th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 16th International Conference on Smart City; IEEE 4th International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS)*. IEEE, 2018.

## References

1. Aydos, M., Aldan, Ç., Coşkun, E., Soydan, A. (2022). Security testing of web applications: A systematic mapping of the literature. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 34(9), 6775-6792, <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.09.018>.
2. Mubshra, Q., Shahid, F., Mohd, H., Nizam, B., Md, N., Atif, A. (2021). A Rigorous Approach to Prioritizing Challenges of Web-Based Application Systems. *Malaysian Journal of Computer Science*, 34, <https://doi.org/10.22452/mjcs.vol34no2.1>.
3. Dukes, L., Yuan, X., Akowuah, F. (2013). A case study on web application security testing with tools and manual testing. *Proceedings of IEEE Southeastcon-2013*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/SECON.2013.6567420>.
4. Shahid, J., Hameed, M., Javed, I., Qureshi, K., Ali, M., Crespi, N. (2022). A Comparative Study of Web Application Security Parameters: Current Trends and Future Directions. *Applied Sciences*, 12, 4077, <https://doi.org/10.3390/app12084077>.
5. Wikipedia (2024). Retrieved from [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%81%D1%82\\_%D0%BD%D0%B0\\_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F1](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D1%81%D1%82_%D0%BD%D0%B0_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F1)
6. Ric Messier. *Penetration Testing Basics: A Quick-Start Guide to Breaking into Systems / Apress*, 2016. 115 p.
7. DSTU ISO/IEC TS 27008:2019 (ISO/IEC TS 27008:2019, IDT) Information technologies. Security methods. [in Ukrainian].
8. Zakon Ukrainy «Pro zakhust informatsii v informatsiino-telekomunikatsiinykh systemakh» [The Law of Ukraine «On the protection of information in information and telecommunication systems» from 2005, № 26]. (n.d.). zakon.rada.gov.ua. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2594-15>. [in Ukrainian].
9. Top 5 Penetration Testing Methodologies and Standards – Retrieved from <https://www.getastra.com/blog/security-audit/penetration-testing-methodology/>.
10. Oriyano Sean-Philip. *Penetration Testing Essentials*. Sybex, a Wiley brand, 2017, 363 p.
11. Baloch Rafay. (2017). *Ethical hacking and penetration testing guide*. Auerbach Publications, 523 p.
12. Wilhelm, Thomas. (2013). *Professional penetration testing: Creating and learning in a hacking lab*. Newnes, 525 p.
13. BSI – Study A Penetration Testing Model. Federal Office for Information Security, 111 p. [https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Publications/Studies/Penetration/penetration\\_pdf.html](https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Publications/Studies/Penetration/penetration_pdf.html)
14. Najera-Gutierrez, Gilberto, and Juned Ahmed Ansari. (2018). *Web Penetration Testing with Kali Linux: Explore the methods and tools of ethical hacking with Kali Linux*. Packt Publishing Ltd.
15. Johansen, Gerard, et al. (2016). *Kali Linux 2—Assuring Security by Penetration Testing*. Packt Publishing Ltd.
16. Buchanan, Cameron, and Vivek Ramachandran. (2017). *Kali Linux Wireless Penetration Testing Beginner's Guide: Master wireless testing techniques to survey and attack wireless networks with Kali Linux, including the KRACK attack*. Packt Publishing Ltd.
17. Denis, Matthew, Carlos Zena, and Thaier Hayajneh. (2016). «Penetration testing: Concepts, attack methods, and defense strategies.» *IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT)*.
18. *Penetration Testing- A hand on introduction to hacking*, Georgia Weidman, no starch press, San Francisco, 2014.
19. Chu, Ge, and Alexei Lisitsa. (2018). «Penetration Testing for Internet of Things and Its Automation.» *IEEE 20th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 16th International Conference on Smart City; IEEE 4th International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS)*.

**Г. В. МАРЧУК**

старший викладач кафедри комп'ютерних наук  
Державний університет «Житомирська політехніка»  
ORCID: 0000-0003-2954-1057

**М. С. ГРАФ**

доктор філософії з комп'ютерних наук,  
завідувач кафедри комп'ютерних наук  
Державний університет «Житомирська політехніка»  
ORCID: 0000-0003-4873-548X

**В. Л. ЛЕВКІВСЬКИЙ**

доктор філософії з інженерії програмного забезпечення,  
доцент кафедри комп'ютерних наук  
Державний університет «Житомирська політехніка»  
ORCID: 0000-0002-1643-0895

**Ю. В. ВЕНГЛОВСЬКА**

магістрантка  
Державний університет «Житомирська політехніка»  
ORCID: 0009-0003-1291-9284

## АНАЛІЗ ТА ПОРІВНЯННЯ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ГЕНЕРАЦІЇ ЛАБІРИНТІВ В КОМП'ЮТЕРНИХ ІГРАХ

*В епоху інформаційного суспільства, де візуалізація ігрових та симуляційних просторів набуває все більшого значення, розробка алгоритмів для генерування лабіринтів стає все більш актуальною. Інтерактивні ігри, віртуальна реальність, навчальні платформи та інші сфери потребують генерації лабіринтів різної складності та конфігурації, щоб забезпечити різноманіття та захоплюючий досвід для гравців та користувачів. Традиційні методи генерації лабіринтів, такі як алгоритм Вілсона або алгоритм Прима, можуть бути обмежені у своїй гнучкості та здатності створювати лабіринти з заданими характеристиками. Процедурні методи генерування лабіринтів пропонують більш гнучкий та потужний підхід. Ці методи дозволяють генерувати лабіринти з різними параметрами, такими як розмір, складність, тип розгалуження, наявність тупиків та інших елементів. Завдяки цьому процедурні методи стають все більш популярними для генерації лабіринтів у широкому спектрі застосувань. Це дослідження має на меті порівняти різні алгоритми генерації лабіринтів. В роботі досліджується та порівнюється п'ять алгоритмів: Recursive Backtracker, Kruskal's Algorithm, Aldous-Broder Algorithm, Hunt-and-Kill Algorithm та Binary Tree Algorithm. Існує необхідність визначення ефективності різних методів з точки зору структурної складності та варіативності створених лабіринтів. Аналіз впливу різних методів на обчислювальні ресурси та час генерації також є ключовим аспектом, особливо у вимогливих застосуваннях, таких як відеоігри чи симуляції. Такий аналіз дозволить визначити оптимальні та ефективні підходи до генерації лабіринтів для різних застосувань. Результати дослідження можуть бути корисними для розробників комп'ютерних ігор, для дослідників штучного інтелекту, які хочуть розробити алгоритми для вирішення задач на маршрутизацію, тощо. Це дослідження допоможе розробникам краще зрозуміти можливості та обмеження кожного алгоритму, щоб зробити свідомий вибір.*

**Ключові слова:** алгоритм, лабіринт, Unity, гра, генерація лабіринту.

**G. V. MARCHUK**

Senior Lecturer at the Department of Computer Sciences  
Zhytomyr Polytechnic State University  
ORCID: 0000-0003-2954-1057

**M. S. GRAF**

PhD in Computer Sciences,  
Associate Professor at the Department of Computer Sciences  
Zhytomyr Polytechnic State University  
ORCID: 0000-0003-4873-548X

V. L. LEVKIVSKYI

PhD in Software Engineering,  
Associate Professor at the Department of Computer Sciences  
Zhytomyr Polytechnic State University  
ORCID: 0000-0002-1643-0895

YU. V. VENHLOVSKA

Master's Student  
Zhytomyr Polytechnic State University  
ORCID: 0009-0003-1291-9284

## ANALYSIS AND COMPARISON OF EXISTING MAZE GENERATION METHODS IN COMPUTER GAMES

*In the era of the information society, where the visualization of game and simulation spaces is becoming increasingly important, the development of algorithms for generating mazes is becoming more and more relevant. Interactive games, virtual reality, educational platforms, and other areas require the generation of mazes of various complexities and configurations to provide variety and an engaging experience for players and users. Traditional maze generation methods, such as the Wilson algorithm or the Prim's algorithm, may be limited in their flexibility and ability to create mazes with specified characteristics. Procedural maze generation methods offer a more flexible and powerful approach. These methods allow generating mazes with different parameters, such as size, complexity, branching type, presence of dead ends, and other elements. As a result, procedural methods are becoming increasingly popular for maze generation in a wide range of applications.*

*This research aims to compare different maze generation algorithms. The paper investigates and compares five algorithms: Recursive Backtracker, Kruskal's Algorithm, Aldous-Broder Algorithm, Hunt-and-Kill Algorithm, and Binary Tree Algorithm. There is a need to determine the efficiency of different methods in terms of structural complexity and variability of the generated mazes. Analyzing the impact of different methods on computational resources and generation time is also a key aspect, especially in demanding applications such as video games or simulations. Such analysis will help identify optimal and efficient approaches to maze generation for different applications. The research results may be useful for game developers, for researchers in artificial intelligence who want to develop algorithms for solving routing problems, and so on. This research will help developers better understand the capabilities and limitations of each algorithm to make an informed choice.*

**Key words:** algorithm, maze, Unity, game, maze generation.

### Постановка проблеми

У сучасному інформаційному суспільстві, де візуалізація ігрових та симуляційних середовищ відіграє важливу роль, розробка процедурних методів генерації лабіринтів стає актуальною задачею. Інтерактивні ігри, віртуальна реальність, навчальні платформи та інші області вимагають генерації різних типів лабіринтів для забезпечення різноманітності та виклику гравців або користувачів.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогоднішній день лабіринт вже не просто головоломка. У галузі комп'ютерних ігор він може служити основною структурою для рівнів, у робототехніці – як платформу для демонстрації навчальних здібностей роботів. В області архітектури його візерунок можна використовувати для прикраси будівлі. Дослідники, які використовують лабіринт у різних галузях, можуть мати різні цілі та потребувати різних властивостей лабіринту. Методів генерації лабіринтів створено та проаналізовано безліч (алгоритм Прима, алгоритм Крускала, бінарне дерево тощо), тож часто виникають труднощі з вибором. Дослідження [1] зосереджено на створенні алгоритму, що вибирає найкращий метод генерації для введених бажаних властивостей проекту. Інноваційний підхід, який успішно створили розробники, добре справляється із задачею, але все ще є деякі випадки, коли складно обрати правильний варіант.

Лабіринти використовуються в розважальних іграх, і це робить їх хорошим прикладом для інтегрування автоматизації генерації [2]. Вони забезпечують створення різних непередбачуваних ігрових середовищ як для аркадних ігор, такі як Ms. Pac-Man [3], так і для 3D програм віртуальної реальності [4], які можуть максимально збільшити занурення, коли вони відчувають оточення лабіринту.

Від текстових пригод Zork до коридорів Doom і міських вулиць Grand Theft Auto, лабіринт часто використовувався як простір для захоплення та заплутування гравців у їхній навігація ігровими світами [5]. Шлях у відеоіграх пов'язаний зі знаходженням об'єктів в ігровому світі. Шлях не можна розглядати окремо від цих об'єктів і їх використання, оскільки реакція гравця на ці об'єкти є одним із способів формування шляху.

Незважаючи на те, що екранне відображення в деяких аспектах допускає «подвійність лабіринту», питання про те, чи пропонують відеоігри і дизайн, і досвід одночасно залишається відкритим для інтерпретації. Ігри

можна обговорювати через відкриття ігрового простору. Граючи в ігровому світі і/та відчуваючи його, гравець багато в чому розкриває більшу частину його дизайну. Це двосторонній процес, головним у якому є гра та дослідження, а початок розуміння дизайну допомагає у подальшому вирішенні головоломок [6].

Тепер зрозуміло, наприклад, що шляхи реального лабіринту, і шляхи ігрового простору часто схожі. Проте видно, що комп'ютерні технології розробляють шляхи-лабіринти по-новому та виразно.

З новими підходами до змішування генерації процедурного контенту з динамічним налаштуванням складності, можна не тільки розробити гру з наявністю нескінченного рівня, використовуючи найменшу кількість дискового простору, але також можна адаптувати його до потужності гравця, гарантуючи, що кожен рівень унікальний не лише за дизайном, але й за досвідом гравця [7-9].

Разом з тим практичне значення таких додатків полягає не тільки у розвагах. Дослідження підтверджують нещодавні припущення про те, що ігри з лабіринтами є багатообіцяючими для фіксації змін у зорово-рухових, зорово-конструктивних і виконавчих функціях, пов'язаних зі старінням і нейродегенерацією. Використовуючи попередньо згенеровані рівні складності головоломок з цього дослідження, можна краще виявляти тонкі зміни в виконавчих і моторних функціях у ширшому діапазоні складності головоломок, схожих на лабіринт, і уникнути ефектів як підлоги, так і стелі. Це дослідження є перехресним, і учасники проходять певний лабіринт лише один раз і вперше [10].

#### Формулювання мети дослідження

Дослідити різні методи генерації лабіринтів, визначити їхню структурну складність та різноманітність результатів. Оцінка ресурсозатратності кожного алгоритму в термінах обчислювального часу та використання пам'яті. Дослідження ефективності різних методів в контексті відеоігор та симуляцій, де важлива якість та економія ресурсів.

Для досягнення мети дослідження необхідно провести дослідження алгоритмів Recursive Backtracker, Kruskal's Algorithm, Aldous-Broder Algorithm, Hunt-and-Kill Algorithm та Binary Tree Algorithm за наступними категоріями:

- ефективність та складність;
- оптимальність використання для Unity;
- швидкість генерації.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Лабіринти в іграх є популярним елементом геймплею, який викликає інтригу, викликає емоції та сприяє розвитку логічного мислення у гравців. Зазвичай лабіринти складаються з вузьких коридорів та перешкод, що утворюють заплутану мережу шляхів. Гравець зазвичай має завдання пройти через лабіринт, знаходячи правильний шлях до виходу або до цільового об'єкта, уникаючи пасток, монстрів або інших небезпек.

Ідеальний лабіринт – це лабіринт, в якому відсутні петлі, і всі вузли доступні. Таким чином, гравець може перейти з одного вузла до будь-якого іншого в ідеальному лабіринті, і є лише один маршрут між цими вузлами. Побудова, або ж генерація, можлива за рахунок використання одного з алгоритмів.

Recursive backtracker. Процес починається з будь-якого вузла сітки лабіринту та переміщується до одного із сусідніх вузлів, який ще не було відвідано. У сітці кожен вузол має не більше чотирьох сусідніх вузлів, з'єднаних ребрами. Після того, як процес переходить до поточного вузла, він рекурсивно переміщується до невідданого сусіднього вузла, поки не відвідає вузол, який відвідував раніше. Коли вузол  $u$  не має невідданих сусідів, він повертається до вузла  $v$ , який відвідував безпосередньо перед вузлом  $u$ , і ребро між  $u$  і  $v$  стає ребром охоплюючого дерева. Потім процес рекурсивно переміщується до інших невідданих сусідніх вузлів від вузла  $v$ , доки він не відвідає вузол, який відвідував раніше. Процес триває, доки не будуть відвідані всі вузли на графі [1].

Для реалізації алгоритму у Unity за допомогою мови C#, можна спочатку згенерувати сітку зі стінами, а потім видаляти проходи. Для цього слугує метод RemoveWalls, який в якості аргументів приймає масив клітинок та розміри сітки. Основна робота відбувається зі списком сусідніх клітинок:

```
List<RecursiveBacktrackerCell> unvisitedNeighbours = new List<RecursiveBacktrackerCell>();
```

Перевірка сусідніх клітинок на те, чи є серед них не відвідана клітинка:

```
//check all 4 neighbours
if (x > 0 && !maze[x - 1, y].visited)
    unvisitedNeighbours.Add(maze[x - 1, y]);
if (y > 0 && !maze[x, y - 1].visited)
    unvisitedNeighbours.Add(maze[x, y - 1]);
if (x < width - 2 && !maze[x + 1, y].visited)
    unvisitedNeighbours.Add(maze[x + 1, y]);
if (y < height - 2 && !maze[x, y + 1].visited)
    unvisitedNeighbours.Add(maze[x, y + 1]);
```

Якщо така знаходиться, то обирається одна навмання та шлях переходить до неї. Інакше повертається до минулого значення зі стеку:

```

if (unvisitedNeighbours.Count > 0){
    RecursiveBacktrackerCell chosen =
        unvisitedNeighbours[Random.Range(0, unvisitedNeighbours.Count)];
    RemoveWall(current, chosen);
    chosen.visited = true;
    current = chosen;
    stack.Push(current);
    current.DistanceFromStart = stack.Count;
}
else{
    current = stack.Pop();
}

```

На рисунку 1 представлено лабіринт 10x10, який згенеровано за алгоритмом Recursive backtracker.

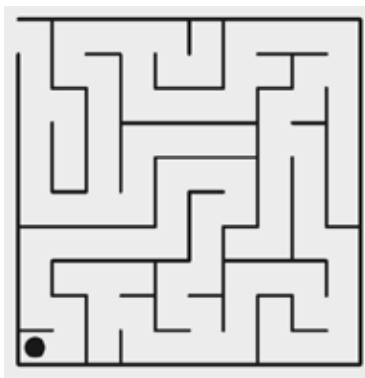


Рис. 1. Лабіринт 10x10, згенерований за алгоритмом Recursive backtracker

Kruskal's algorithm. На початку кожен вузол міститься у власному наборі. Припустимо, що є група всіх ребер сітки. Грань вибирається випадковим чином і видаляється в групі. Якщо обидва суміжні вузли вибраного ребра знаходяться в різних наборах, ребро стає ребром охоплюючого дерева, і ці набори об'єднуються в один набір. Якщо обидва суміжні вузли вибраного ребра знаходяться в однакових наборах, оскільки ребро збирається утворити петлю, ребро просто видаляється з групи ребер. Цей алгоритм зупиняється, коли всі вузли знаходяться в одному наборі [1].

Для реалізації методу у Unity можна написати метод RemoveWalls, який прорізуватиме потрібні проходи. Спочатку кожній клітинці потрібно дати унікальний ідентифікатор:

```

//give unique id
int tmp = 1;
for (int x = 0; x < width; x++){
    for (int y = 0; y < height; y++){
        maze[x, y].id = tmp;
        tmp++;
    }
}

```

Далі потрібно оголосити словники для лівих та нижніх стін (у клітинки є лише дві стіни, щоб не виникло накладок):

```

List<KruskalCell> wallsLeft = new List<KruskalCell>();
List<KruskalCell> wallsBottom = new List<KruskalCell>();

```

Для видалення ж стіни із словника з лівими стінами можна використати код:

```

int randomId = Random.Range(0, wallsLeft.Count);
KruskalCell cell = wallsLeft[randomId];
wallsLeft.RemoveAt(randomId);
if (cell.X != 0 && cell.X != width-1) //if the cell is not in first or last column{
    if (cell.id != maze[cell.X - 1, cell.Y].id) //if id differ, delete the wall
    {
        cell.wallLeft = false;

        //change id
        int idToChange = cell.id;
        foreach (KruskalCell mazeCell in maze){
            if (mazeCell.id == idToChange){
                mazeCell.id = maze[cell.X - 1, cell.Y].id;
            }
        }
    }
}
}
}

```

На рисунку 2 представлено лабіринт 10x10, який згенеровано за алгоритмом Kruskal's algorithm.

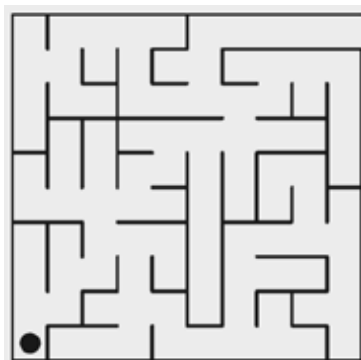


Рис. 2. Лабіринт 10x10, згенерований за алгоритмом Kruskal's algorithm

Aldous-Broder algorithm. Алгоритм Aldous-Broder – це імовірнісний алгоритм для генерації рівномірного кістяка на неорієнтованому графі  $G = (V, E)$ . Алгоритм починається з будь-якого вузла. Потім випадковим чином відвідує одного зі своїх сусідів, і наступна дія визначається на основі статусу відвідування сусіда. Якщо сусідній вузол ще не відвідано, цей вузол і попередній вузол з'єднані ребром остовного дерева. Якщо сусідній вузол було відвідано, процес просто переходить до наступного сусіда. Потім він знову переходить до випадкового сусіда. Процес триває, доки не будуть відвідані всі вузли. Зауважте, що є випадки, коли цей алгоритм ніколи не закінчується, оскільки останні кілька вузлів не знайдені випадковим чином. Коли всі вузли відвідано, процес завершується створенням остовного дерева [1].

Основним методом в коді можна зробити RemoveWalls, що видалятиме потрібні стіни. Спочатку обирається випадкова клітинка та позначається як відвідана:

```

//choose random cell and mark it as visited
int cellX = Random.Range(1, width - 1);
int cellY = Random.Range(1, height - 1);
AldousBroderCell currentCell = maze[cellX, cellY];
currentCell.visited = true;

```

Далі у циклі випадковим чином обирається один із чотирьох сусідів. Якщо він не був відвіданий, то стінка між ним та попередньою клітинкою видаляється:

```

if (!cellNeighbour.visited){
    currentCell.wallLeft = false;
    cellNeighbour.visited = true;
}

currentCell = cellNeighbour;

```



Процес повторюється, поки існують невідвідані клітинки. На рисунку 3 представлено лабіринт 10x10, який згенеровано за алгоритмом Aldous-Broder algorithm.

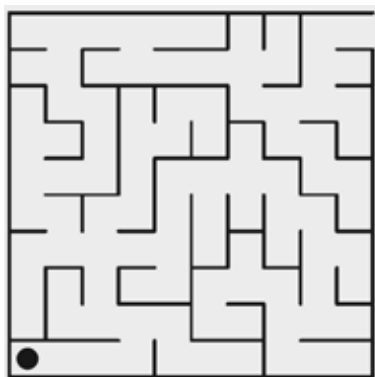


Рис. 3. Лабіринт 10x10, згенерований за алгоритмом Aldous-Broder algorithm

Hunt-and-Kill algorithm. Процес починається з режиму «знищення». Він починається в будь-якому вузлі  $u$  сітки. Потім процес переміщується до одного з невідвіданих сусідніх вузлів, вузла  $v$ , випадковим чином. Ребро між вузлами  $u$  і  $v$  стає ребром остовного дерева. Процес послідовно переміщується до невідвіданих сусідів, поки не досягне вузла, де немає невідданого сусіда. Це режим вбивства. Після цього процес переходить у режим пошуку. У режимі пошуку процес сканує сітку, щоб знайти невідвіданий вузол,  $w$ , який є сусіднім з одним із відвіданих вузлів, вузлом  $x$ . Процес відвідує вузол  $w$ , і ребро між вузлами  $w$  і  $x$  стає ребром остовного дерева. Потім він переходить у режим «знищення» та знову переміщується до одного зі своїх невідвіданих сусідів. Процес зупиняється, коли відвідуються всі вузли в сітці [1].

Метод Kill(HuntAndKillCell[,] maze, int currentX, int currentY, int width, int height) приймає в якості аргументів масив клітинок лабіринту, ідентифікатори поточної клітинки та розміри лабіринту. Роль методу – видалити стіну між поточною клітинкою та однією із сусідніх, вибір якої проходить шляхом перевірки, чи вона ще не відвідана.

```

if (neighbourCell.X == currentX){
    if (neighbourCell.Y > currentY && neighbourCell.Y < height - 1){
        neighbourCell.wallBottom = false;
    }
    else{
        currentCell.wallBottom = false;
    }
}
else{
    if (neighbourCell.X > currentX && neighbourCell.X < width - 1){
        neighbourCell.wallLeft = false;
    }
    else{
        currentCell.wallLeft = false;
    }
}
currentX = neighbourCell.X;
currentY = neighbourCell.Y;

```

На рисунку 4 представлено лабіринт 10x10, який згенеровано за алгоритмом Hunt-and-Kill algorithm.

Binary Tree Algorithm. Для кожної комірки в сітці випадковим чином виділяється прохід на північ або на захід, також можна вибрати між іншими наборами діагоналей: північ/схід, південь/захід або південь/схід, але будь-який набір діагоналей має використовуватися постійно, весь лабіринт. Недоліком цього алгоритму є те, що він має сильний діагональний ухил, тобто коридори охоплюють межі вибраного напрямку. Крім того, дві з чотирьох сторін лабіринту будуть охоплені одним проходом.

Метод для даного алгоритму доволі простий. У циклі кожній клітинці, за умови, що та не знаходиться з крайнього нижнього або лівого краю, видаляється нижня або ліва стіна.

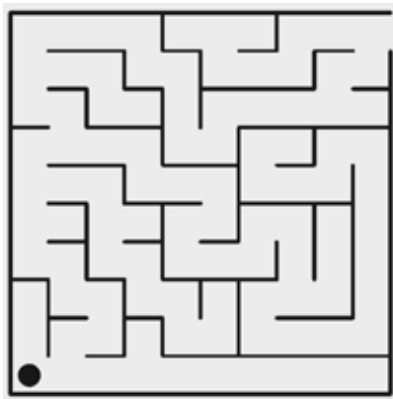


Рис. 4. Лабіринт 10x10, згенерований за алгоритмом Hunt-and-Kill algorithm

```
private void RemoveWalls(BinaryTreeCell[,] maze, int width, int height){
    for (int x = 0; x < width - 1; x++){
        for (int y = 0; y < height - 1; y++){
            //carve a passage either south or west
            bool deleteLeftWall = Random.RandomRange(0, 2) == 0;
            if (y < 1 && x < 1){
                continue;
            }
            else if (x < 1){
                deleteLeftWall = false;
            }
            else if (y < 1){
                deleteLeftWall = true;
            }

            if (deleteLeftWall){
                maze[x, y].wallLeft = false;
            }
            else{
                maze[x, y].wallBottom = false;
            }
        }
    }
}
```

На рисунку 5 представлено лабіринт 10x10, який згенеровано за алгоритмом Binary Tree algorithm.

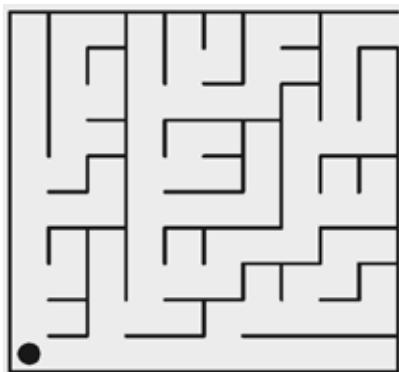


Рис. 5. Лабіринт 10x10, згенерований за алгоритмом Binary Tree algorithm

**Результати дослідження**

В результаті дослідження були визначені переваги і недоліки алгоритмів різних методів створення лабіринтів. У таблиці 1 представлені переваги і недоліки досліджуваних алгоритмів.

Таблиця 1

**Переваги і недоліки досліджуваних алгоритмів**

Алгоритм	Переваги	Недоліки
Recursive backtracker	Простий та легко реалізований	Може створювати лабіринти з великою кількістю довгих коридорів
Kruskal's algorithm	Генерує лабіринти з рівномірно розподіленими шляхами	Обчислювально витратний для великих лабіринтів
Aldous-Broder algorithm	Простий та безупинний процес	Велика варіативність форми лабіринту. Не завжди ефективний для випадкової ходьби
Hunt-and-Kill algorithm	Може створити лабіринти з відкритими просторами. Збалансована випадковість та структура	Випадковість може призводити до менш передбачуваних лабіринтів
Binary Tree Algorithm	Простий та легкий для реалізації. Швидкий та ефективний	Один напрямок утворення коридорів. Обмежена варіативність форми лабіринту

У таблиці 2 представлені результати роботи алгоритмів відносно використаних ресурсів.

Таблиця 2

**Порівняння алгоритмів відносно використання ресурсів**

Алгоритм	Використання ресурсів	Час виконання генерації лабіринту розміром (у мілісекундах)			
		10x10	50x50	100x100	250x250
Recursive backtracker	Використовує пам'ять для стеку рекурсії	8	136	754	6985
Kruskal's algorithm	Використовує пам'ять для зберігання наборів	15	163	1508	21725
Aldous-Broder algorithm	Вимагає додаткової пам'яті для зберігання стану лабіринту	30	864	12953	50009
Hunt-and-Kill algorithm	Використовує пам'ять для зберігання стану та поточних координат	15	230	1028	7460
Binary Tree Algorithm	Використовує пам'ять для зберігання стану та поточних координат	6	189	623	4412

На основі даних, отриманих в результаті дослідження, побудовано графік (рис. 6), на якому зображується залежність часу побудови від розміру лабіринту для кожного з алгоритмів. Найбільш стрімко зростає графік алгоритму Aldous-Broder algorithm (синього кольору). Найменше часу займає побудова за допомогою Binary Tree Algorithm (фіолетовий колір графіку). Між ними розташовані: Kruskal's algorithm – червоний колір, Hunt-and-Kill algorithm – помаранчевий колір та Recursive backtracker – зелений колір.

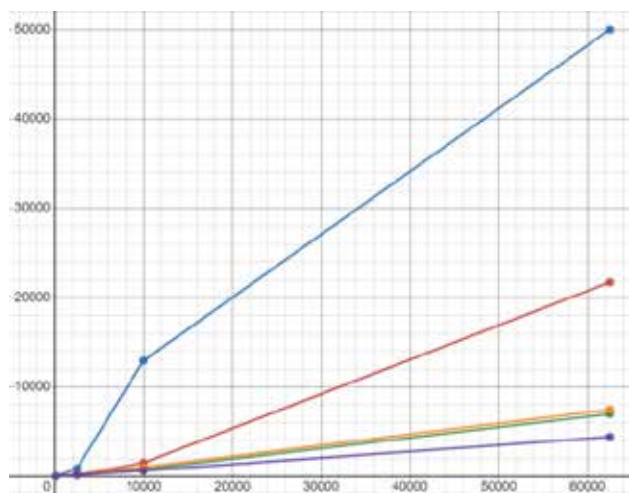


Рис. 6. Графік залежності часу побудови лабіринту від розміру лабіринту для різних алгоритмів

### Висновки

В результаті дослідження було проаналізовано та порівняно алгоритми генерації лабіринтів. Отже, можна скласти заключну характеристику методів.

За ефективністю та складністю:

– Recursive Backtracker простий та ефективний, але може призводити до створення довгих та вузьких коридорів.

– Kruskal's Algorithm, ефективний, особливо для великих лабіринтів. Застосовує об'єднання наборів ребер.

– Aldous-Broder Algorithm не завжди ефективний через випадковий вибір шляхів, може мати велику кількість зайвих рухів.

– Hunt-and-Kill Algorithm варіативний, але може вести до створення лабіринтів з нерівномірним розподілом шляхів.

– Binary Tree Algorithm простий та швидкий, але створює лабіринти з сильним діагональним ухилом.

За оптимальністю використання для Unity:

– Recursive Backtracker легко реалізовується в Unity, підходить для основних лабіринтів.

– Kruskal's Algorithm вимагає управління структурою даних, але добре підходить для більших лабіринтів.

– Aldous-Broder Algorithm може бути менш ефективним через випадковий вибір шляхів, але реалізується в Unity.

– Hunt-and-Kill Algorithm складніший у реалізації в Unity, може бути менш оптимальним для деяких проєктів.

– Binary Tree Algorithm швидкий та простий у реалізації в Unity, але має свої обмеження у структурі лабіринту.

За швидкістю генерації:

– У Recursive Backtracker швидка генерація, для великих лабіринтів час збільшується поступово.

– Kruskal's Algorithm невеликі лабіринти генеруються досить швидко, але зі збільшенням розмірів час різко збільшується.

– У Aldous-Broder Algorithm генерація займає дуже багато часу, особливо для великих лабіринтів.

– У Hunt-and-Kill Algorithm генерація досить швидка, час росте досить плавно зі збільшенням розмірів лабіринту.

– У Binary Tree Algorithm генерація відбувається дуже швидко, навіть для великих лабіринтів.

Отже, у кожного з алгоритмів є свої переваги та недоліки, але, враховуючи час та вигляд лабіринту, оптимальний вибір – Recursive backtracker. Даний метод легко реалізувати, він швидкий та не потребує багато ресурсів. Його можна обрати для проєкту, який не має особливих вимог. Але не потрібно нехтувати іншими методами, так як вони можуть гарантувати різноманітність форм лабіринту, навіть якщо генерація займе більше часу.

### Список використаної літератури

1. Kim P. H. Intelligent Maze Generation. 2019. URL: [http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc\\_num=osu1563286393237089](http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=osu1563286393237089).

2. Bontchev B., Panayotova R. Towards Automatic Generation of Serious Maze Games for Education. *Serdica Journal of Computing*. 2018. Vol. 11, no. 3-4. P. 249–278. URL: <https://doi.org/10.55630/sjc.2017.11.249-278>.

3. Safak A. B., Bostanci E., Soylocicek A. E. Automated Maze Generation for Ms. Pac-Man Using Genetic Algorithms. *International Journal of Machine Learning and Computing*. 2016. Vol. 6, no. 4. P. 226–230. URL: <https://doi.org/10.18178/ijmlc.2016.6.4.602>.

4. Jeong K., Kim J. Event-Centered Maze Generation Method for Mobile Virtual Reality Applications. *Symmetry*. 2016. Vol. 8, no. 11. P. 120. URL: <https://doi.org/10.3390/sym8110120>.

5. Mazes in videogames: meaning, metaphor and design. *Choice Reviews Online*. 2013. Vol. 51, no. 02. P. 51–0692–51–0692. URL: <https://doi.org/10.5860/choice.51-0692>.

6. Gazzard A. Paths, players, places : towards an understanding of mazes and spaces in videogames : thesis. 2010. URL: <http://hdl.handle.net/2299/4804>.

7. Nwankwo G., Mohammed S., Fiaidhi J. Procedural Content Generation for Dynamic Level Design and Difficulty in a 2D Game Using UNITY. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*. 2017. Vol. 12, no. 9. P. 41–52. URL: <https://doi.org/10.14257/ijmue.2017.12.9.04>.

8. Watkins R. *Procedural Content Generation for Unity Game Development*. Packt Publishing, Limited, 2016.

9. Марчук Г.В., Любченко Д.В. Генерація лабіринтів за допомогою алгоритму Hunt and Kil. «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського». Серія: технічні науки, Том 35(74) № 3 Ч.1. 2024. С. 130-135. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.1/20>

10. Development and Evaluation of Maze-Like Puzzle Games to Assess Cognitive and Motor Function in Aging and Neurodegenerative Diseases / T. Nef et al. *Frontiers in Aging Neuroscience*. 2020. Vol. 12. URL: <https://doi.org/10.3389/fnagi.2020.00087>.

## References

1. Kim P. H. (2019) Intelligent Maze Generation. URL: [http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc\\_num=osu1563286393237089](http://rave.ohiolink.edu/etdc/view?acc_num=osu1563286393237089).
2. Bontchev B., Panayotova R. (2018) Towards Automatic Generation of Serious Maze Games for Education. *Serdica Journal of Computing*. Vol. 11, no. 3-4. P. 249–278. URL: <https://doi.org/10.55630/sjc.2017.11.249-278>.
3. Safak A. B., Bostanci E., Soylicicek A. E. (2016) Automated Maze Generation for Ms. Pac-Man Using Genetic Algorithms. *International Journal of Machine Learning and Computing*. Vol. 6, no. 4. P. 226–230. URL: <https://doi.org/10.18178/ijmlc.2016.6.4.602>.
4. Jeong K., Kim J. (2016) Event-Centered Maze Generation Method for Mobile Virtual Reality Applications. *Symmetry*. Vol. 8, no. 11. P. 120. URL: <https://doi.org/10.3390/sym8110120>.
5. Mazes in videogames: meaning, metaphor and design. *Choice Reviews Online*. 2013. Vol. 51, no. 02. P. 51–0692–51–0692. URL: <https://doi.org/10.5860/choice.51-0692>.
6. Gazzard A. (2010) Paths, players, places : towards an understanding of mazes and spaces in videogames : thesis. URL: <http://hdl.handle.net/2299/4804>.
7. Nwankwo G., Mohammed S., Fiaidhi J. (2017) Procedural Content Generation for Dynamic Level Design and Difficulty in a 2D Game Using UNITY. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*. Vol. 12, no. 9. P. 41–52. URL: <https://doi.org/10.14257/ijmue.2017.12.9.04>.
8. Watkins R. (2016) *Procedural Content Generation for Unity Game Development*. Packt Publishing, Limited.
9. Marchuk G.V., Liubchenko D.V. (2024) Heneratsiia labiryntiv za dopomohoiu alhorytmu Hunt and Kil. «Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho». Seriia: tekhnichni nauky, Tom 35(74) № 3 Ch.1. S.130-135. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.3.1/20> [in Ukrainian].
10. Development and Evaluation of Maze-Like Puzzle Games to Assess Cognitive and Motor Function in Aging and Neurodegenerative Diseases / T. Nef et al. *Frontiers in Aging Neuroscience*. 2020. Vol. 12. URL: <https://doi.org/10.3389/fnagi.2020.00087>.

**Д. В. МЕЛЬНИЧЕНКО**

магістр  
Державний університет «Житомирська політехніка»  
ORCID: 0009-0004-9632-4380

**Т. А. ВАКАЛЮК**

доктор педагогічних наук, професор,  
завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення  
Державний університет «Житомирська політехніка»  
ORCID: 0000-0001-6825-4697

**О. В. ФАРРАХОВ**

кандидат технічних наук,  
в.о. вченого секретаря  
Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення  
моніторингу об'єктів атомної енергетики  
Національної академії наук України  
ORCID: 0000-0003-4988-126X

**І. В. ГОРДІЄНКО**

кандидат педагогічних наук, доцент,  
доцент кафедри математики та економіки  
Дрогобицький державний педагогічний університет  
імені Івана Франка  
ORCID: 0000-0001-6182-4968

## ПРОЕКТУВАННЯ ВЕБЗАСТОСУНКУ ДЛЯ КЕРУВАННЯ РОБОЧИМ ЧАСОМ

*З розвитком технологій та змінами в бізнес-середовищі, автоматизація процесів обліку та планування робочого часу стає критично важливою. Використання вебзастосунків для цих завдань дозволяє підприємствам оптимізувати внутрішні процеси, підвищити продуктивність і забезпечити точність обліку робочого часу. Метою даної роботи є розробка вебзастосунку для управління робочим часом з елементами системи управління персоналом, який забезпечить автоматизацію, оптимізацію та спрощення процесів обліку та планування робочого часу. Цей вебзастосунок має на меті забезпечити ефективне використання робочих ресурсів та полегшити керування завданнями і проектами, надаючи користувачам зручний та інтуїтивний інтерфейс.*

*Архітектура відіграє ключову роль у реалізації системи, забезпечуючи високу масштабованість для подальшого розвитку проекту. Надійність і гнучкість архітектури дозволяє розширювати проект у майбутньому, перетворюючи його на комплексну систему управління персоналом. Це забезпечує можливість інтеграції нових функцій та модулів, які підвищують функціональність та ефективність системи.*

*Особливу увагу приділено зручності користувацького інтерфейсу, який дозволяє користувачам легко взаємодіяти з елементами системи, забезпечуючи їм приємний досвід роботи. Інтерфейс розроблений таким чином, щоб мінімізувати час навчання користувачів та максимізувати продуктивність їхньої роботи.*

*Розроблений вебзастосунок може бути впроваджений у діяльність підприємств різних галузей для автоматизації обліку та планування робочого часу. Це дозволить підвищити ефективність управління робочими процесами, знизити витрати часу на адміністративні процедури та покращити продуктивність працівників. Система також забезпечує точність даних, що сприяє оптимізації внутрішніх процесів компаній та створенню основи для подальшого розвитку повноцінної системи управління персоналом.*

**Ключові слова:** вебзастосунок, архітектура, персонал, управління, час.

**D. V. MELNYCHENKO**

Master's Student  
Zhytomyr Polytechnic State University  
ORCID: 0009-0004-9632-4380

**T. A. VAKALIUK**

Doctor of Pedagogical Sciences, Professor,  
Head of the Department of Software Engineering  
Zhytomyr Polytechnic State University  
ORCID: 0000-0001-6825-4697

O. V. FARRAKHOV

PhD, Acting Academic Secretary  
Centre for Information, Analytical and Technical Support  
for Monitoring of Nuclear Facilities  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0000-0003-4988-126X

I. V. HORDIENKO

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Mathematics and Economics  
Drohobych Ivan Franko State Pedagogical  
ORCID: 0000-0001-6182-4968

## WEB APPLICATION DESIGN FOR WORKING TIME MANAGEMENT

*With technology development and changes in the business environment, automation of time tracking and scheduling processes is becoming critical. Using web applications for these tasks allows enterprises to optimise internal processes, increase productivity and ensure time-tracking accuracy. This paper aims to develop a web-based time management application with elements of a personnel management system that will automate, optimise and simplify the processes of time tracking and scheduling. This web application aims to ensure efficient use of work resources and facilitate task and project management by providing users with a user-friendly and intuitive interface.*

*The architecture plays a vital role in the system's implementation, ensuring high scalability for further project development. The architecture's reliability and flexibility allow the project to be expanded in the future, turning it into a comprehensive HR management system. This ensures that new functions and modules can be integrated to improve the system's functionality and efficiency.*

*Particular attention is paid to the user interface, which allows users to easily interact with the system elements and provides them with a pleasant working experience. The interface is designed to minimise the user learning curve and maximise productivity.*

*The developed web application can be implemented in the activities of enterprises of various industries to automate the accounting and planning of working time. This will increase the efficiency of workflow management, reduce time spent on administrative procedures and improve employee productivity. The system also ensures the accuracy of data, which helps to optimise the internal processes of companies and create the basis for the further development of a full-fledged HR management system.*

**Key words:** web application, architecture, personnel, management, time.

### Постановка проблеми

Сучасні підприємства, незалежно від їхньої галузі, стикаються з необхідністю ефективного управління робочим часом та персоналом. З розвитком технологій та змінами в бізнес-середовищі, автоматизація процесів обліку та планування робочого часу стає критично важливою. Використання вебзастосунків для цих завдань дозволяє підприємствам оптимізувати внутрішні процеси, підвищити продуктивність і забезпечити точність обліку робочого часу. В умовах сучасної конкуренції на ринку, такі інструменти стають стратегічно важливими для підтримання ефективності та конкурентоспроможності компаній.

Окрім того, компанії потребують інструментів, які дозволяють легко планувати та контролювати робочий час, забезпечують автоматизацію підрахунку відпрацьованих годин, управління запитами на відпустки та лікарняні, а також інші адміністративні процедури. Інтеграція всіх цих функцій у одному вебзастосунку надає підприємствам значні переваги, включаючи економію часу, підвищення точності даних та поліпшення продуктивності працівників.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика ефективного управління часом стає дедалі актуальнішою в наукових колах. Розглянемо деякі ключові дослідження в цій галузі. Писаревська Г. І. зосередила свою увагу на потенціалі тайм-менеджменту як інструменту для оптимізації процесів управління персоналом [4]. Група науковців об'єднала зусилля для вивчення специфіки застосування технік тайм-менеджменту в роботі державних службовців [6]. Євтушенко Г. І. та Дерев'яно В. М. провели ґрунтовний аналіз поточного стану управління робочим часом та запропонували методи підвищення ефективності впровадження тайм-менеджменту в організаціях [3]. Примак Т. Ю. та Васильчук О. В. розглянули можливості підвищення продуктивності туристичних підприємств за допомогою методів тайм-менеджменту [7]. При цьому Крикун О. О. та Медяник Ю. Г. зробили акцент на дослідженні цифрових інструментів, які можуть допомогти менеджерам створити дієву систему управління часом [5].

### Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є розробка вебзастосунку для управління робочим часом з елементами системи управління персоналом.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Враховуючи специфіку проекту, використаємо модель керування доступом на основі дозволів (permission-based access control, RBAC), що забезпечує більш гнучке та детальне налаштування прав доступу для кожного користувача. Модель RBAC дозволяє визначати та надавати специфічні дозволи окремим користувачам або групам користувачів залежно від їхніх функціональних обов'язків та потреб. Це забезпечує підвищену безпеку та ефективність управління доступом, дозволяючи користувачам виконувати лише ті операції, на які вони мають відповідні дозволи.

Вебзастосунок орієнтований на масштабованість і гнучку архітектуру. Тому важливо впровадити більшість інструментів, які дозволять згодом реалізувати всі необхідні функції для такої великої і складної програми, як система управління персоналом. Наявність цих інструментів у системі є критично важливою, оскільки вони зможуть вирішувати більшість проблем, навіть якщо наразі функціонал, реалізований за їх допомогою, ще не є значним.

Сформулюємо вимоги до системи, беручи до уваги принцип контролю доступу на основі дозволів. Відповідно до потреб компанії користувач може мати найрізноманітніший набір дозволів, тож наведені нижче вимоги користувачів це лише декілька із прикладів потреб компанії.

#### Вимоги користувачів:

1. Звичайний робітник: авторизація і відновлення паролю; відстеження робочого часу; керування власним робочим часом та перегляд планувальника інших; перегляд записів про старі відпустки, наявність інформації про наявну кількість балансу відпустки, створення нового запиту на відпустку; перегляд записів про лікарняні; перегляд детальної статистики про відпрацьовані години місяця.

2. Бухгалтер: завантаження файлу із статистикою за місяць; чітко бачити відпрацьовані години користувача протягом певного періоду часу; доступ до інформації про відпустки, лікарняні інших робітників і вихідні дні.

3. HR-менеджер: керування вихідними даними; редагування даних профілю; активація та деактивація акаунту; реєстрація нових користувачів; керування відпустками інших користувачів.

#### Функціональні вимоги:

- відсутність традиційної реєстрації, користувача в системі має реєструвати людина із відповідним дозволом. Після отримання листа користувач завершує реєстрацію самостійно встановивши собі пароль;
- можливість зручно і швидко знайти потрібного робітника;
- потрібно надати можливість зручно відслідковувати час користувачам. Для тих, хто працює повний робочий день, має бути присутнє автоматичне нарахування 8 годин на день;
- візуалізація статистичної інформації для кращого сприйняття;
- зручний перегляд інформації про години за допомогою планувальника;
- створення сторінки налаштувань для додавання гнучкості елементам системи;
- отримувати сповіщення у вигляді email-листів коли це необхідно.

Аналіз вимог до вебзастосунку дозволив краще сформулювати об'єктно орієнтовану структуру системи і реалізувати потрібні елементи системи. Для прикладу розглянемо діаграму класів модулю користувачів (рис. 1). На діаграмі класів добре видно взаємодії елементів системи, розглянемо їх детальніше. **DapperContext** – створює і керує підключенням до бази даних за допомогою Dapper ORM, яка лежить в основі взаємодії із базою даних.

Абстрактний клас **Repository**, який є батьківським для усіх репозиторіїв, забезпечує базові спільні операції CRUD для сутностей, а також використовує DapperContext для взаємодії із базою даних. Кожен клас репозиторію прив'язаний до своєї таблиці в базі даних, наприклад **UserRepository** (таблиця Users) чи **SettingsRepository** (таблиця Settings). Іноді потрібна більш комплексна логіка для взаємодії із об'єктами бази даних, наприклад клас **SettingsManager** керує налаштуваннями застосунку, включаючи збереження та оновлення конфігурацій, які зберігаються в серіалізованому форматі. Таким чином використовуючи таку обгортку над репозиторієм, можемо взаємодіяти із налаштуваннями так, ніби виконуємо стандартні CRUD-операції.

Інтерфейс **IMailTemplateManager**, який реалізується класом **MailTemplateManager**, створений для того щоб читати інформацію із ресурсних файлів (.resx). В нашому випадку ресурсний файл зберігає шаблони листів для відправки. Для відправки email-листів створено інтерфейс **IMailer**, реалізований через відповідний клас **Mailer**. Mailer використовує раніше описаний IMailTemplateManager для читання шаблону листу, підстановки в нього потрібних значень та його відправки. Для зберігання таких налаштувань пошти як хост, порт, пароль та інших, використовується клас **MailSettings**, який читає ці дані із конфігурації. Хоч клас Mailer із відповідним інтерфейсом вже можна використовувати для відправки листа, набагато зручніше використовувати класи-обгортки, які будуть робити це за нас. Наприклад клас **AuthMailer** реалізує логіку надсилання листів пов'язаних із автентифікацією (встановлення паролю), для чого необхідно просто викликати метод.



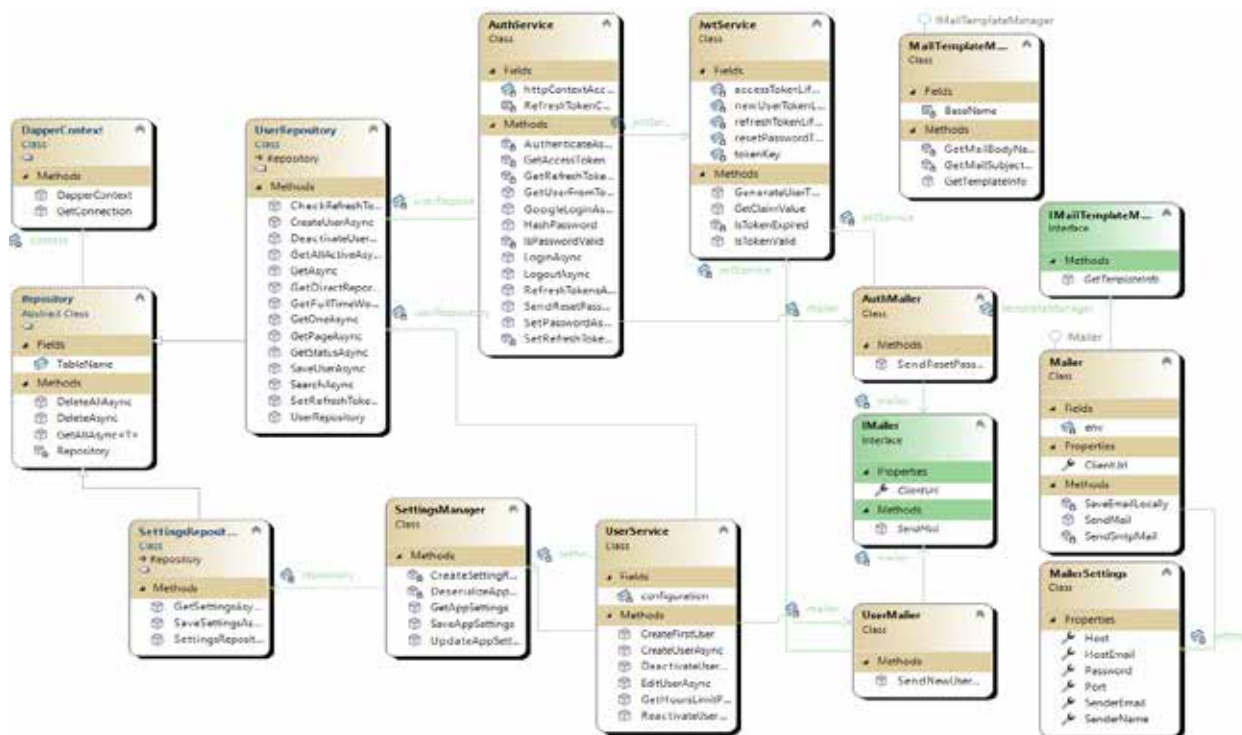


Рис. 1. Діаграма класів для модулю користувача

Такі класи, як **UserService** виконують основні функції системи, до них звертаються класи що реалізують API. **UserService** це клас для управління користувачами, що виконує логіку управління цими користувачами. Він використовує інші класи для реалізації алгоритмів, такі як **UserRepository**, **SettingsManager** чи **UserMailer**. Алгоритми класу визначають коли потрібно звернутися до бази даних, надіслати лист чи просто провести обрахунки.

**JwtService** – це клас, що лежить в основі автентифікації користувачів і містить методи для генерації, валідації та читання JWT токенів для користувачів. **AuthService** покладається на цей клас для автентифікації користувачів, включаючи управління токенами доступу, хешування паролів, встановлення cookie, встановлення токенів і паролів користувачів в базу даних за допомогою класу **UserRepository**, відправки листів за допомогою класу **AuthMailer**.

Для забезпечення усіх вимог, поставлених до вебзастосунку, потрібно спроектувати основні алгоритми роботи системи. Загальний алгоритм роботи системи можна описати як безперервну взаємодію користувача з вебінтерфейсом для, який в свою чергу використовуючи потоків даних сигналізує клієнтській логіці про необхідність створення запиту до серверу. Сервер, використовуючи GraphQL, обробляє запит використовуючи внутрішню бізнес логіку, за потреби використовує базу даних для діставання чи мутації даних. Результатом є надання відповіді клієнтській частині застосунку після чого нові дані оновлюють стан системи і перемальовують інтерфейс.

Наведемо загальний алгоритм роботи на конкретному прикладі за допомогою діаграми активності – створення запиту на відпустку (рис. 2).

Розглянемо окремі фрагменти коду, що потребують детального огляду, звернувши увагу на статистично-аналітичний модуль. Він виконує логіку для отримання статистичних чи аналітичних даних. Розглянемо як відбувається обрахунок відпрацьованої кількості днів.

1. Обраховується загальна кількість робочих днів у заданому діапазоні часу за допомогою методу **GetWorkingDays(from, to)**.

2. Отримання даних про свята та скорочені дні:

2.1. Отримуються дати свят у вказаному діапазоні за допомогою репозиторію **holidayRepository**.

2.2. Обраховуються дні відпочинку на основі свят через метод **GetDayOffDays(holidays, from, to)**.

2.3. Обраховуються скорочені дні через метод **GetShortDays(holidays, from, to)**.

3. Отримання даних про відпустки, лікарняні та робочі сесії:

3.1. Отримуються ідентифікатори користувачів.

3.2. Викликаються відповідні репозиторії для отримання відпусток, лікарняних та робочих сесій у вказаному діапазоні часу:

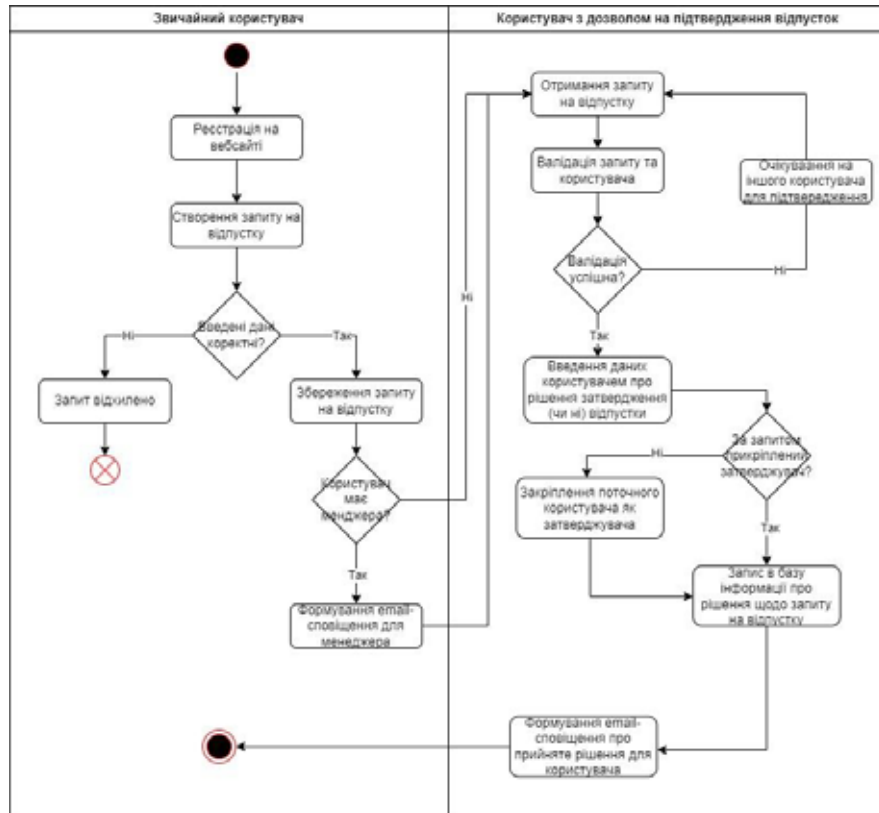


Рис. 2. Діаграма активності для створення і затвердження запиту на відпустку

4. Обрахунок індивідуальних зведень для кожного користувача:

- 4.1. Для кожного користувача обчислюється кількість годин на день, враховуючи його ставку зайнятості.
- 4.2. Обчислюється загальна кількість годин, які користувач має відпрацювати.
- 4.3. Віднімаються години на основі днів відпочинку та скорочених днів.
- 4.4. Віднімаються години на основі відпусток та лікарняних днів.
- 4.5. Обчислюються фактичні години, які користувач відпрацював.
- 4.6. Обчислюється відсоток відпрацьованих годин від запланованих.
- 4.7. Створюється об'єкт IndividualHoursSummary для кожного користувача з розрахованими даними.

5. Повертається об'єкт HoursSummaryResult, що містить загальну кількість робочих днів, кількість святкових днів, кількість днів відпочинку та індивідуальні зведення для кожного користувача.

Таким чином, метод забезпечує детальний обчислення відпрацьованих годин для кожного користувача з урахуванням святкових днів, відпусток та лікарняних, його годинної ставки та інших деталей як виключення годин, які вже були виключені під час відрахування усіх днів суботи та неділі.

Розглянемо клієнтську частину та деталі її реалізації. Підвантажування сторінок це певний механізм, який дозволяє зробити запит на отримання інформації із серверу, для функціонування сторінки. При цьому навігація не відбудеться доки запит не завершиться. Найбільшою перевагою такого підходу є майже повна ізоляція всієї логіки роботи навігації і підвантаження від компонентів, які займаються промальовуванням вебінтерфейсу. Зі сторони компонента, відбувається лише перехід за посиланням, в той час як система аналізує нове посилання, робить запит до серверу, якщо це потрібно, формує дані для сторінки і встановлює їх для загального стану системи, знаходить і промальовує потрібну сторінку. При цьому компонент не має жодної додаткової логіки, на момент завантаження він використовує дані, що вже будуть в стані системи.

В реалізації такого підходу було використано реактивне програмування. Маючи можливість поставити в стан програми будь-яку потрібну сторінку і дані, можемо не тільки ізолювати логіку від відображення, а й забезпечити актуальність даних. Розглянемо як саме визначаємо переадресацію на новий шлях, знаходимо потрібний обробник, робимо запит за потреби і оновлюємо стан сторінки. В цьому допоміг еріс, який є частиною бібліотеки Redux-Observable, що дає змогу керувати побічними ефектами в Redux за допомогою реактивного програмування RxJS.

```

export const loadPageStateEpic: Epic<LocationChangedAction> = (action$, state$, dependencies) =>
  action$.pipe(
    ofType(LOCATION_CHANGE),
    switchMap(({ payload: { location } }) => {
      const routes = routeBuilder.allRoutes;
      const possibleMatches = matchRoutes(routes, location.pathname);

      if (!possibleMatches || possibleMatches.length !== 1)
        return of(push(routeBuilder.routes.notFound));

      const match = possibleMatches[0];
      const pattern = possibleMatches[0].route.path;
      const handler = getPageHandler(pattern);

      const routeData: RouteData = {
        location,
        params: match.params,
        pattern,
      };

      return state$.pipe(
        first(({ general }) => !general.isInitialLoading),
        switchMap(state => handler(state, dependencies, routeData).pipe(
          concatMap(page => of(
            setUrlParams(match.params),
            setPageState(page),
            setPageLoading(false),
          )),
          startWith(setPageLoading(true)),
        )),
      );
    })),
  );

```

Розглянемо покроково дії, що виконує епіс:

1. Епіс підписується на action (подія в Redux), який відповідний за зміну шляху в url. Тобто як тільки шлях змінився, епіс реагує на це і починає свою роботу, що гарно пояснює концепції реактивного програмування.
2. Action, що спричинив роботу цього епіс, містить інформацію про новий url-шлях, за допомогою чого маємо знайти його шаблон, наприклад «/user/profile/5» буде відповідати шаблону «/user/profile/:userId», де userId дорівнює 5.
3. Після знаходження потрібного шаблону, підготовлюємо дані для передачі його в обробник сторінки (pageHandler), про який розказано нижче. Дані включають актуальний стан системи, всю дані маршруту та залежності, такі як клас для взаємодії із API чи об'єкт для створення роруп сповіщень.
4. Отримуємо потрібний обробник сторінки, який є унікальним для кожної сторінки. Зокрема, коли користувач переходить на сторінку створення відпустки, відпрацьовує наступний обробник:

```

export const vacationCreateHandler: PageHandler<VacationCreatePageState> = (_, { api }) => {
  return api.Request<VacationCreateStateResponse>(getVacationCreatePageStateRequest).pipe(
    map(({ data }) => ({
      pageName: PageName.vacationsRequest,
      balanceS: data.vacation.getVacationBalance,
      bookedDays: data.vacation.getBookedDays,
    })),
  );
};

```

Обробник отримав дані із серверу про наявний баланс відпусток користувача, створив новий об'єкт сторінки і повернув його до епіс. Використання цього механізму доводить наскільки корисними і зручними можуть бути концепції реактивного програмування. Наведемо для прикладу також інший епіс, який є відповідальним за підвантаження актуальної сесії користувача для відображення в компоненті для відслідковування робочих годин:

```
export const getTrackerInfoEpic: Epic = (_, state$, { api }) =>
  state$.pipe(
    filter(({ currentUser, tracker }) => currentUser.isLoggedIn && tracker.requireUpdate),
    exhaustMap(({ currentUser }) => makeTrackerRefreshRequest(api, currentUser.user!.id)),
  );

const makeTrackerRefreshRequest = (api: Api, userId: string) => api.Request<GetTrackerInfoResponse>(
  getTrackerInfoRequest,
  {
    userId,
    dayDate: formatDateOnlyString(dayjs()),
  },
).pipe(
  map(({ data: { workSession, user } }) => {
    const activeWS = workSession.getActive;
    const workedTime = workSession.getWorkedTimeForDay;
    const dayWorkTimeRate = user.getHoursPerDay;

    return loadTrackerInfo({
      activeWorkSession: activeWS,
      workedTimeForDayMS: workedTime,
      workRatePerDayMS: dayWorkTimeRate,
    });
  }),
);
```

1. Епіс підписується на загальний стан системи застосування.
2. Епіс проводить фільтрацію стану, щоб визначити чи треба йому починати роботу. В даному випадку він почне роботи, якщо користувач увійшов у систему та трекер потребує оновлення даних актуальної робочої сесії.
3. Якщо стан пройшов фільтрацію, то епіс робить запит до серверу для отримання актуальної сесії користувача.
4. Після отримання відповіді від серверу, епіс встановлює дані в стан системи, що спричинить перемальовування компоненту для відслідковування робочого часу.

Опишемо окремі складові структури інтерфейсу розробленого додатку. Взаємодія користувачів із системою відбувається через вебзастосунок. Більшість функцій системи вимагають від користувача бути авторизованим, адже це платформа зав'язана на збиранні інформації для конкретної людини.

Головна сторінка – це перше, що бачить користувач, коли заходить до вебсайту. Одним із найважливіших елементів системи є трекер, який надає можливість користувачу засікати час, який потім буде збережений в системі (див. рис. 3).

Це один із ключових елементів, і доступ до нього має бути присутній завжди, тому було прийнято рішення розмістити його у вигляді кнопки, що завжди зафіксована на дні сторінки. При натисканні кнопки відбудеться відображення додаткової панелі, де буде відображені такі елементи як актуальна робоча сесія, кількість відпрацьованого часу за сьогодні, шкала для демонстрації потрібного відпрацьованого часу за сьогодні (див. рис. 4).

Для користувача з усім дозволами, є можливість налаштувати систему відповідно до власних потреб. Однією із найвідвідуваніших сторінок неодмінно буде сторінка із переліком усіх працівників (рис. 5).

Для відображення даних на цій та подібних цій сторінці використовували таблиці, для яких було додано велика кількість елементів для зручності, серед них пагінація, зміна кількості елементів на сторінці, сортування за колонками, зміна розмірів колонки, приховування колонок, зміна висоти рядка, пошук, кнопка авторозміру сторінки та розширені фільтри. Цих елементів куди більш достатньо аби забезпечити зручне користування таблицею із великою кількістю даних.

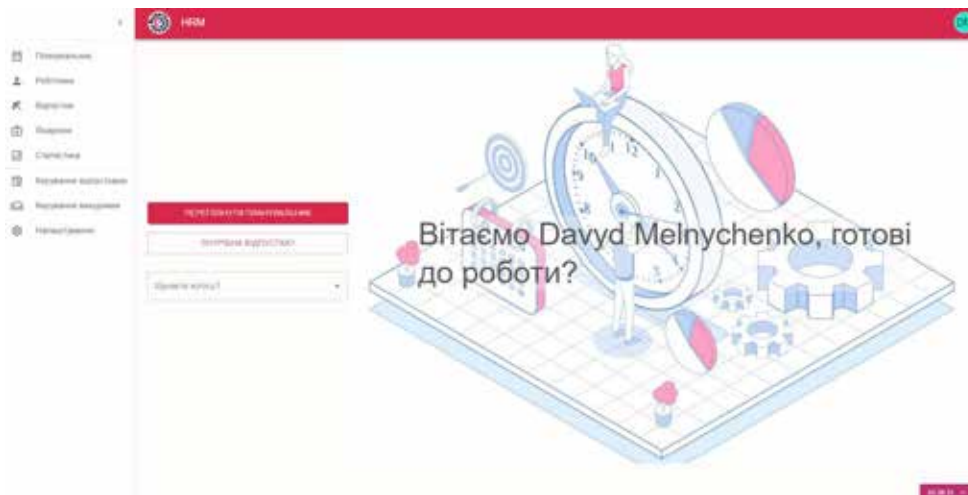


Рис. 3. Головна сторінка

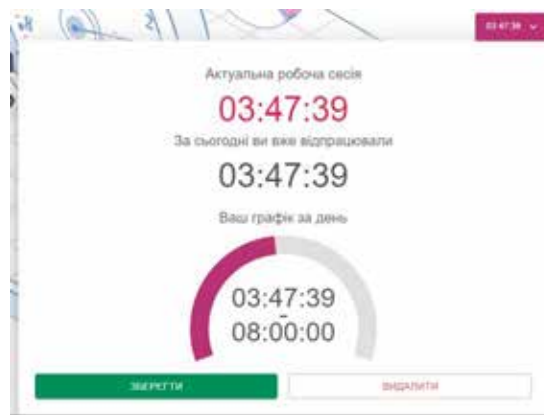


Рис. 4. Відображення відкритої зафіксованої панелі трекера

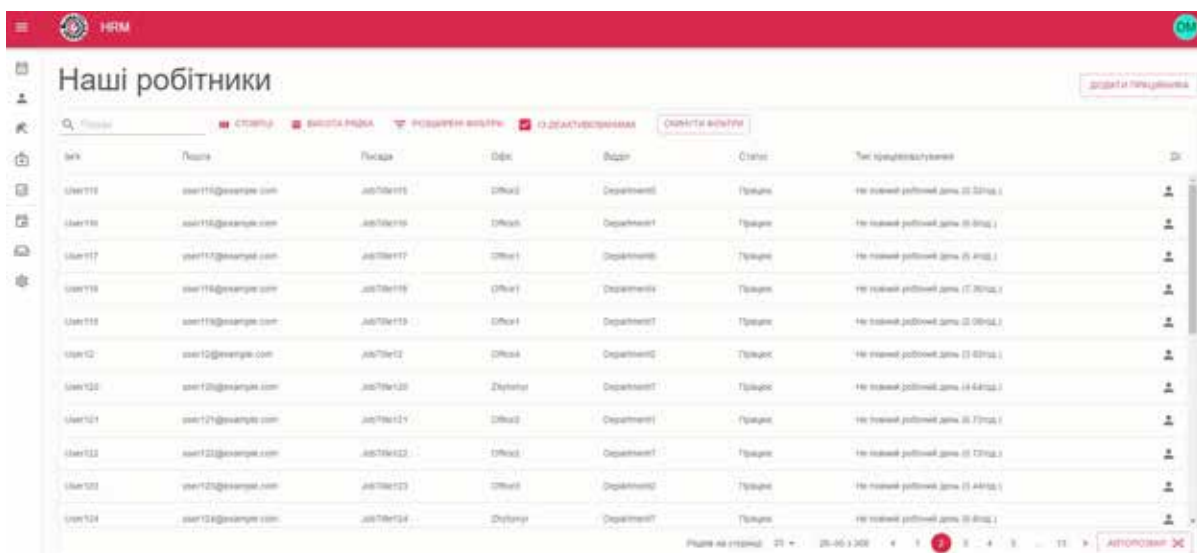


Рис. 5. Сторінка з переліком робітників і таблицею

Для додавання нового користувача в систему теж є окрема сторінка, яка містить форму для введення усіх полів із відповідною валідацією та іншими елементами. Якщо форму заповнює користувач із усіма дозволами, то на форму будуть присутні додаткові поля для встановлення чи редагування дозволів користувача що створюється чи редагується.

Розглянемо функціонал відпусток, яку можна поділити на звичайну сторінку та адміністративну (рис. 6). Сторінки виконані з використанням компонента таблиці, аналогічного до того, який знаходиться на сторінці користувачів. На сторінці відпусток користувач має змогу побачити власні запити на відпустку та їх статус, а також існує можливість відмінити запит поки менеджер не погодив відповідь на нього. На сторінці також вказується кількість часу відпустки, яку вдалося накопичити протягом усього часу, а також кількість зарезервованих днів, у випадку якщо є погоджені відпустки, час яких ще не настав.

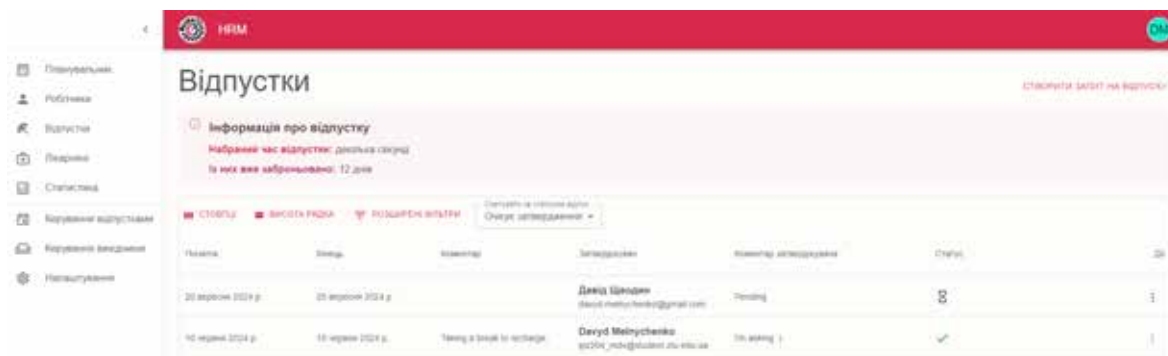


Рис. 6. Сторінка відпусток

Сторінка створення запити на відпустку має аналогічний елемент інформації про зарезервований і накопичений час (рис. 7). А також додаткові поля валідація запити, наприклад форма буде відображати попередження якщо користувач створює запит на відпустку, де кількість вказаних днів перевищує кількість накопичених днів. Для затвердження відпусток існує окрема сторінка, доступ до якої мають лише користувачі із відповідним дозволом, сторінка також представлена у вигляді таблиці. Для лікарняних була використана аналогічна схема з компонентом-таблицею із відмінністю у тому, що присутня лише одна сторінка, де користувачі без дозволу можуть лише переглядати інформацію, а з дозволом – редагувати, створювати та видаляти. У випадку із святами відмінність полягає у наявності форми для створення та редагування на самій сторінці поряд з таблицею.

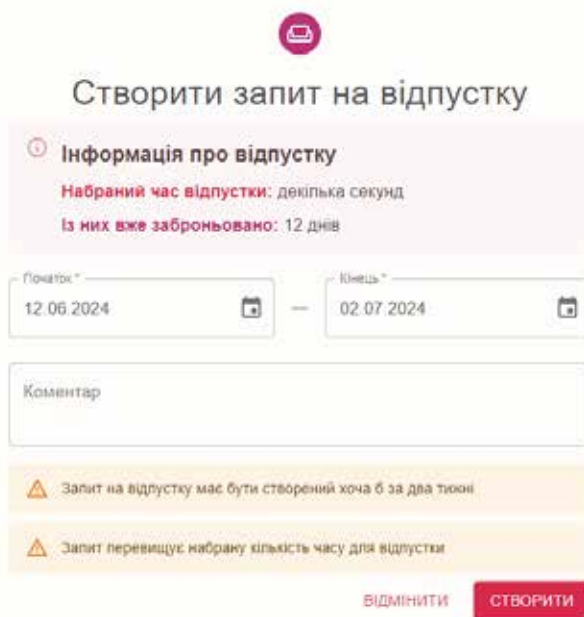


Рис. 7. Форма створення відпустки

Сторінка профілю містить дані про користувача у вигляді карток, поділених на групи для зручності. Меню керування, до складу якого входить наприклад редагування чи деактивація працівника. А також графік, який демонструє початок і кінець робочих сесій користувача протягом місяця і приблизний прогнозований час коли його найвірогідніше можна зустріти на роботі (рис. 8).

Розглянемо сторінку статистики, яка збирає статистичну інформацію про відпрацьовані години для працівників (рис. 9). Сторінка теж використовує компонент таблиці і деякі додаткові елементи, наприклад вибір місяця, загальна інформація про кількість робочих днів у місяці та вихідні в ньому. Зверху присутня кнопка завантаження звіту в вигляді excel-файлу. По кожному користувачу також можна переглянути детальну інформацію, яка подається у вигляді графіків та детального опису проведених обрахунків (рис. 10).

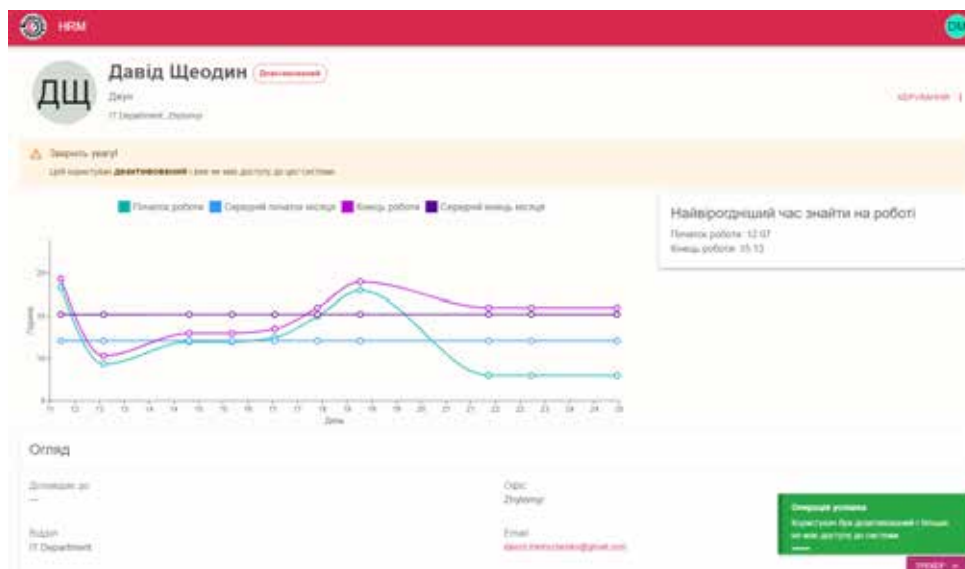


Рис. 8. Сторінка профілю працівника

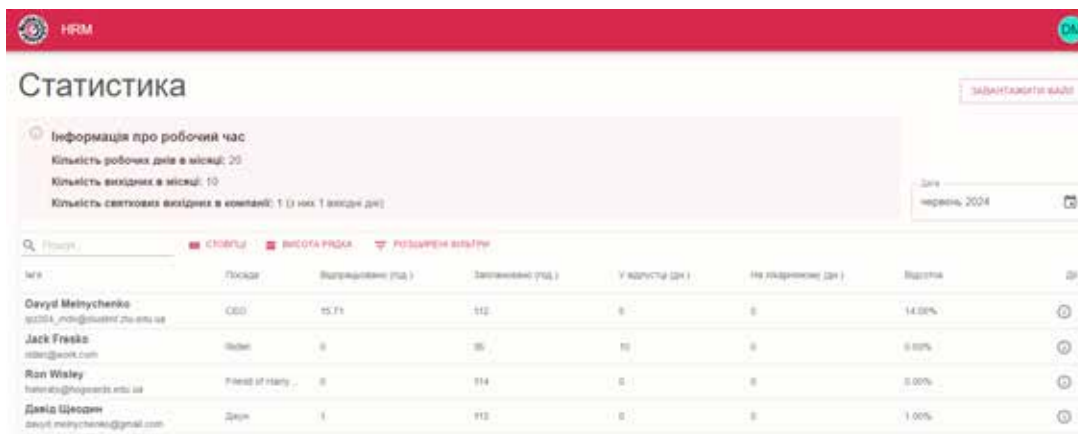


Рис. 9. Сторінка статистики

Якщо користувач бажає отримати інформацію про робочий час, редагувати його чи звірити її із кимось іншим, він може скористатися сторінкою планувальника. Планувальник представляє собою календар, на якому відображають проведені робочі сесії, свята, відпустки та лікарняні. Календар підтримує перегляд окремого дня, тижня чи місяця, а також режим порядку денного (Agenda). Для зручності календар також підтримує зображення інших користувачів на календарі, що дає змогу порівнювати їх робочі сесії. Також користувачів можна відображувати на різному календарі, використовуючи розділений режим. При потребі користувач може сховати заплановані робочі сесії.

Для додавання інших користувачів, можна скористатися боковою панеллю, яка відображається над календарем на менших екранах (рис. 11–12).

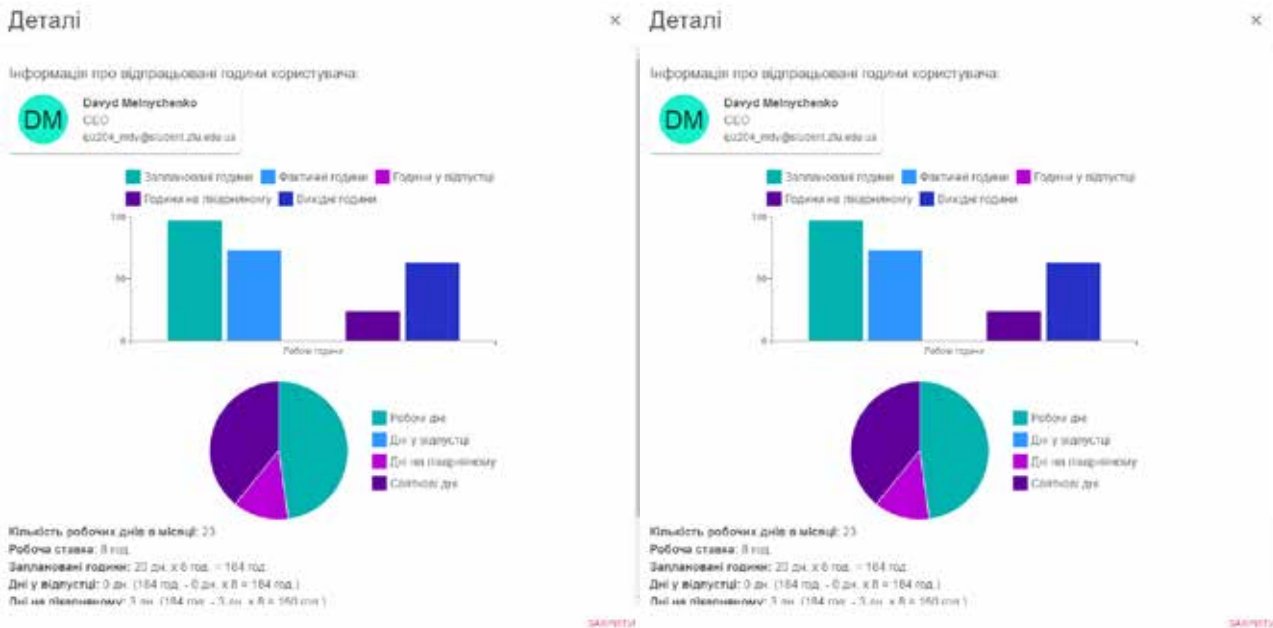


Рис. 10. Детальна статистика для одного користувача



Рис. 11. Сторінка планування в режимі перегляду місяця

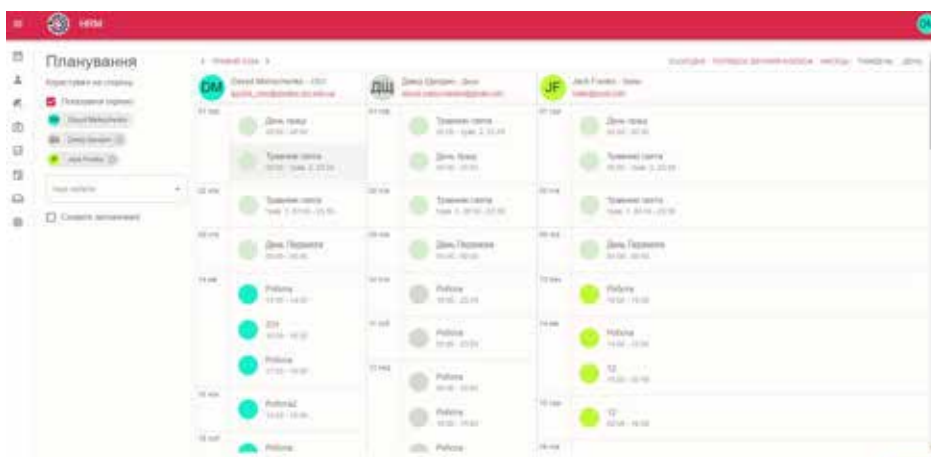


Рис. 12. Сторінка планування в режимі порядку денного



### Висновки

Результатом виконання роботи є розроблений і готовий до використання вебзастосунок для управління робочим часом з елементами системи управління персоналом, який забезпечує автоматизацію, оптимізацію та спрощення процесів обліку та планування робочого часу.

В результаті було створено масштабовану, потужну і надійну архітектурц, яка дозволяє проекту і надалі еволюціонувати у напрямку вебзастосунку для управління людським персоналом.

Розроблений вебзастосунок може бути впроваджений у діяльність підприємств різних галузей для автоматизації обліку та планування робочого часу. Це дозволить підвищити ефективність управління робочими процесами, знизити витрати часу на адміністративні процедури та покращити продуктивність працівників. Система також забезпечує точність даних, що сприяє оптимізації внутрішніх процесів компаній та створенню основи для подальшого розвитку повноцінної системи управління персоналом. Вебзастосунок може забезпечити централізоване місце для усієї інформації про робочий час, що полегшує доступ до цієї інформації та її аналіз.

До перспектив подальших досліджень відносимо можливість розширення функціоналу пропонованого додатку шляхом додавання функції автоматичного відстеження часу, яка би допомогла користувачам точніше відстежувати свій робочий час, інтеграції з іншими системами, такими як системи управління проектами або календарі, щоб надати користувачам більше контексту про свою роботу.

### Список використаної літератури

1. SQL Sever. User-defined functions [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://learn.microsoft.com/en-us/sql/relational-databases/user-defined-functions/user-defined-functions?view=sql-server-ver16>.
2. Мельниченко Д.В. Вакалюк Т.А., Веб застосунок для керування робочим часом: огляд аналогів. Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки, 13–17 травня 2024 року. Житомир, 2024. С. 71-73. <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/06/sekcija-4.pdf>
3. Євтушенко Г. І., Дерев'янюк В. М. Аналіз стану управління робочим часом та шляхи підвищення ефективності застосування «Тайм-менеджменту» в організації. Збірник наукових праць Національного університету державної податкової служби України. 2014. № 1. С. 88-96. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/zpnuodps\\_2014\\_1\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/zpnuodps_2014_1_12)
4. Писаревська Г. І. Використання тайм-менеджменту для підвищення ефективності управління персоналом. Науковий вісник Херсонського державного університету. Сер. : Економічні науки. 2016. Вип. 20(1). С. 148-153. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvkhdu\\_en\\_2016\\_20%281%29\\_38](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvkhdu_en_2016_20%281%29_38)
5. Крикун О. О., Медяник Ю. Г. Вибір менеджером електронних інструментів для створення ефективної системи тайм-менеджменту. Проблеми сучасних трансформацій. Серія: економіка та управління, 11, 2024. DOI: 10.54929/2786-5738-2024-11-04-04
6. Технології тайм-менеджменту в управлінській діяльності державних службовців: монографія / Л.Л. Приходченко, Н.В. Піроженко, М.П. Кернова, І.М Синчак; під заг. ред Л.Л. Приходченко. Одеса: ОРІДУ НАДУ, 2021. 180 с.
7. Примак Т. Ю., Васильчук О. В. Тайм-менеджмент як інструмент підвищення ефективності діяльності туристичного підприємства. Ефективна економіка. 2019. № 12. DOI: 10.32702/2307-2105-2019.12.70

### References

1. SQL Server. User-defined functions [Electronic resource]. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/sql/relational-databases/user-defined-functions/user-defined-functions?view=sql-server-ver16>. [in English].
2. Melnychenko D.V., Vakaliuk T.A. (2024) Veb zastosunok dlia keruvannia robochym chasom: ohliad analogiv [Web application for work time management: review of analogues]. Tezy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi on-line konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh, prysviachenoi Dniu nauky, 13–17 travnia 2024. Zhytomyr, pp. 71-73. [in Ukrainian].
3. Yevtushenko H.I., Dereviianko V.M. (2014) Analiz stanu upravlinnia robochym chasom ta shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti zastosuvannia «Taim-menedzhmentu» v orhanizatsii [Analysis of working time management and ways to increase the effectiveness of «Time management» in the organization]. Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnogo universytetu derzhavnoi podatkovoi sluzhby Ukrainy, no. 1, pp. 88-96. [in Ukrainian].
4. Pysarevska H.I. (2016) Vykorystannia taim-menedzhmentu dlia pidvyshchennia efektyvnosti upravlinnia personalom [Using time management to increase the efficiency of personnel management]. Naukovyi visnyk Khersonskoho derzhavnoho universytetu. Ser.: Ekonomichni nauky, vol. 20(1), pp. 148-153. [in Ukrainian].
5. Krykun O.O., Medianyk Yu.H. (2024) Vybir menedzherom elektronnykh instrumentiv dlia stvorennia efektyvnoi systemy taim-menedzhmentu [Manager's choice of electronic tools for creating an effective time management system]. Problemy suchasnykh transformatsii. Serii: ekonomika ta upravlinnia, no. 11. [in Ukrainian].

6. Prykhodchenko L.L., Pirozhenko N.V., Kernova M.P., Sychak I.M. (2021) Tekhnolohii taim-menedzhmentu v upravlinskii diialnosti derzhavnykh sluzhbovtsiv: monohrafiia [Time management technologies in the management activities of civil servants: monograph]. Odesa: ORIDU NADU. [in Ukrainian].

7. Prymak T.Yu., Vasylchuk O.V. (2019) Taim-menedzhment yak instrument pidvyshchennia efektyvnosti diialnosti turystychnoho pidpriemstva [Time management as a tool to increase the efficiency of a tourist enterprise]. Efektyvna ekonomika, no. 12. [in Ukrainian].

УДК 004.8: 004.738.5

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.31>**Ю. Л. НОВІКОВ**

кандидат технічних наук,  
в. о. заступника завідувача відділом автоматизованих систем  
програмно-цільового управління № 19  
Інститут програмних систем Національної академії наук України  
ORCID: 0009-0006-9800-8765

**І. М. ГАМОР**

аспірант  
Інститут програмних систем Національної академії наук України  
ORCID: 0009-0003-6952-3918

**С. В. ПОПЕРЕШНЯК**

кандидат фізико-математичних наук, доцент,  
доцент кафедри інформатики та програмної інженерії  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ORCID: 0000-0002-0531-9809

## ОГЛЯД МОДЕЛЕЙ ТА АЛГОРИТМІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ІНТЕРФЕЙСІВ ДОДАТКІВ НА ОСНОВІ ПОВЕДІНКОВИХ ДАНИХ КОРИСТУВАЧІВ

У статті розглядаються математичні моделі та алгоритми для оптимізації інтерфейсів додатків, які базуються на аналізі поведінки користувачів. Основна мета дослідження – підвищення якості взаємодії користувачів із додатками шляхом вдосконалення дизайну та функціональності інтерфейсів. Особлива увага приділена вивченню поведінкових даних користувачів. Було проведено збір та аналіз поведінкових даних користувачів (кліки, час взаємодії, сесії, помилки, частота повернення до додатку) для виявлення патернів, які впливають на зручність та ефективність використання інтерфейсів. В роботі було проведено детальний огляд сучасних моделей для оцінки і покращення інтерфейсів додатків, які використовуються для аналізу поведінкових даних користувачів і враховують їхні реальні потреби. Було визначено критерії якості інтерфейсів та шляхи їх досягнення. В роботі встановлено цілі та методи оптимізації дизайну і взаємодії, які будуть ефективними та зручними для користувачів. У статті наведено перспективи впровадження моделей оптимізації. Було визначено основні виклики, пов'язані з впровадженням моделей та алгоритмів для автоматизації покращення інтерфейсів, а також запропоновано напрямки для подальших досліджень у цій сфері. Запропоновані моделі враховують ключові поведінкові дані, такі як кількість кліків, час взаємодії, кількість сесій та помилок, що дозволяє виявляти патерни поведінки і на їх основі приймати рішення щодо покращення користувацького досвіду. Для тестування ефективності змін використовуються алгоритми А/В-тестування та регресійного аналізу. Стаття також пропонує рекомендації для розробників і дизайнерів щодо підвищення зручності, продуктивності та залученості користувачів через персоналізацію та покращення доступності інтерфейсів. Впроваджені моделі та алгоритми дозволяють ефективно адаптувати інтерфейси під реальні потреби користувачів, що сприяє підвищенню загальної продуктивності додатків і поліпшенню користувацького досвіду.

**Ключові слова:** інтерфейси додатків, оптимізація, поведінка користувачів, моделі, якість інтерфейсу, юзабіліті, рекомендації.

**YU. L. NOVIKOV**

Candidate of Technical Sciences,  
Acting Deputy head of the Department of Automated Systems  
of Program and Target Management № 19  
Institute of Software Systems of National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0009-0006-9800-8765

**I. M. HAMOR**

Postgraduate Student  
Institute of Software Systems of National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0009-0003-6952-3918

S. V. POPERESHNYAK

Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Informatics  
and Software Engineering  
National Technical University of Ukraine  
“Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
ORCID: 0000-0002-0531-9809

## OVERVIEW OF MODELS AND ALGORITHMS FOR OPTIMIZING APPLICATION INTERFACES BASED ON USER BEHAVIORAL DATA

*The article examines mathematical models and algorithms for optimizing application interfaces based on user behavior analysis. The main goal of the research is to improve the quality of user interaction with applications by enhancing interface design and functionality. Special attention is given to studying user behavioral data. User behavior data (clicks, interaction time, sessions, errors, frequency of returning to the app) were collected and analyzed to identify patterns that affect the usability and efficiency of interfaces.*

*The paper provides a detailed review of modern models used for evaluating and improving application interfaces, which analyze user behavior data and take into account their actual needs. Criteria for interface quality and ways to achieve them were identified. The study establishes goals and methods for optimizing design and interaction to ensure they are effective and convenient for users. The article also outlines the prospects for implementing optimization models, highlighting key challenges associated with deploying models and algorithms for automating interface improvements, as well as suggesting directions for further research in this area.*

*The proposed models consider key behavioral data such as click count, interaction time, session numbers, and errors, allowing the identification of behavior patterns that inform decisions to enhance user experience. A/B testing and regression analysis algorithms are used to test the effectiveness of the changes. The article also provides recommendations for developers and designers on improving usability, performance, and user engagement through personalization and enhanced interface accessibility.*

*The implemented models and algorithms enable efficient adaptation of interfaces to real user needs, contributing to improved overall application performance and a better user experience.*

**Key words:** application interfaces, optimization, user behavior, models, interface quality, usability, recommendations.

### Постановка проблеми

Сучасні мобільні та веб-додатки відіграють ключову роль у цифровому середовищі, де користувацький досвід є критичним фактором успіху. Інтерфейси додатків, їх зручність та ефективність стали важливими аспектами, що визначають рівень залученості користувачів та їхню задоволеність продуктом. У цьому контексті оптимізація інтерфейсів на основі поведінкових даних користувачів є одним із найперспективніших напрямів досліджень, оскільки дозволяє створювати інтерфейси, що адаптуються до потреб користувачів у реальному часі.

Останніми роками стрімко розвиваються алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту, які дозволяють аналізувати великі обсяги поведінкових даних користувачів (час сесії, кількість кліків, помилки, частота повернень) і автоматично підлаштовувати інтерфейси під їхні індивідуальні потреби. Це робить процес взаємодії з додатками більш інтуїтивним та ефективним. Різні підходи до аналізу цих даних, зокрема використання нейронних мереж та кластеризаційних алгоритмів, дають можливість не лише оптимізувати існуючі інтерфейси, але й прогнозувати майбутні потреби користувачів, тим самим підвищуючи рівень персоналізації та задоволення від використання додатків.

У цій статті розглядаються основні моделі та алгоритми, які застосовуються для оптимізації інтерфейсів додатків на основі поведінкових даних користувачів. Особлива увага приділяється сучасним підходам до автоматичної адаптації інтерфейсів, а також викликам, які постають при їх впровадженні в реальні цифрові продукти.

### Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є здійснення огляду існуючих моделей і алгоритмів для оптимізації інтерфейсів додатків на основі поведінкових даних користувачів. Це дозволить визначити сучасні підходи до аналізу користувацького досвіду, оцінки ефективності інтерфейсів та створення адаптивних систем, що покращують взаємодію користувача з додатками.

Для досягнення мети сформуємо наступні задачі дослідження:

1. Вивчення поведінкових даних користувачів. Провести збір та аналіз поведінкових даних користувачів (кліки, час взаємодії, сесії, помилки, частота повернення до додатку) для виявлення патернів, які впливають на зручність та ефективність використання інтерфейсів.

2. Аналіз існуючих моделей оптимізації інтерфейсів. Провести детальний огляд сучасних моделей для оцінки і покращення інтерфейсів додатків, які використовуються для аналізу поведінкових даних користувачів і враховують їхні реальні потреби.

3. Визначити критерії якості інтерфейсів та шляхи їх досягнення. Встановити чіткі цілі та методи оптимізації дизайну і взаємодії, які будуть ефективними та зручними для користувачів.

4. Визначення перспектив і викликів у впровадженні моделей оптимізації. Оцінити основні виклики, пов’язані з впровадженням моделей та алгоритмів для автоматизації покращення інтерфейсів, а також запропонувати напрямки для подальших досліджень у цій сфері.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

За останні роки дослідження у сфері моделей та алгоритмів для оптимізації інтерфейсів додатків, що базуються на аналізі поведінки користувачів, зосередилися на використанні машинного навчання, штучного інтелекту та адаптивних моделей для покращення користувацького досвіду.

Дослідження в напрямі адаптивних інтерфейсів передбачають створення інтелектуальних адаптивних інтерфейсів, які автоматично підлаштовуються під поведінку користувачів [1-3]. Наприклад, моделі на основі мультиагентного навчання з підкріпленням можуть автоматично змінювати компоненти інтерфейсу на основі частоти використання елементів користувачем, що покращує загальну продуктивність та зручність використання. Це дозволяє створювати інтерфейси, що адаптуються до різних сценаріїв використання, залежно від контексту взаємодії та потреб користувача (наприклад, адаптація інтерфейсу мобільного додатка в реальному часі).

Глибокі нейронні мережі, зокрема convolutional neural networks (CNN), широко використовуються для автоматичного аналізу поведінкових даних користувачів та оцінки інтерфейсів. Такі моделі можуть передбачати ефективність нових інтерфейсів на основі зібраних даних, що дозволяє розробникам оцінювати дизайн на етапі проєктування. Це особливо корисно для визначення оптимальних кольорів, розташування елементів та шрифтів, що покращує естетику і зручність користування додатком [4-5].

Алгоритми машинного навчання, зокрема автоенкодера та методи кластеризації, використовуються для групування користувачів на основі їхньої поведінки. Це дозволяє створювати персоналізовані інтерфейси, які краще відповідають індивідуальним потребам різних сегментів користувачів, підвищуючи залученість та зручність використання. Дослідження в цій сфері також охоплюють аналіз багатовимірних поведінкових послідовностей для прогнозування дій користувачів і подальшої оптимізації інтерфейсу [6].

Ці підходи дозволяють розробникам створювати інтерфейси, які динамічно адаптуються до потреб користувачів, покращуючи їхній досвід та ефективність роботи додатків.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

**Вивчення поведінкових даних користувачів для покращення інтерфейсів**

Збір та аналіз поведінкових даних користувачів є ключовими етапами для розуміння того, як користувачі взаємодіють з додатком. Ці дані дозволяють виявити патерни, які впливають на зручність та ефективність використання інтерфейсів, допомагаючи розробникам приймати обґрунтовані рішення щодо оптимізації дизайну та функціональності.

В таблиці 1 наведено основні типи поведінкових даних.

Таблиця 1

**Основні типи поведінкових даних**

Тип даних	Опис	Що показує
Кліки (Clicks)	Кількість і тип кліків, які користувачі здійснюють в інтерфейсі (наприклад, на кнопки, посилання або меню).	Кліки вказують на те, які елементи інтерфейсу користувачі активно використовують, і чи є в інтерфейсі «сліпі зони», де елементи залишаються непоміченими. Вони також можуть показати, чи користувачі випадково роблять неправильні кліки, що може свідчити про неефективний дизайн.
Час взаємодії (Session Duration)	Середній час, який користувач проводить у додатку за одну сесію.	Час взаємодії може свідчити про рівень залученості користувача. Якщо час короткий, це може вказувати на те, що користувачі не можуть швидко знайти потрібну інформацію або функції, або ж вони не зацікавлені в додатку через складність його використання.
Кількість сесій (Number of Sessions)	Кількість разів, коли користувач повертається до додатку протягом певного періоду.	Висока кількість сесій свідчить про високу залученість користувачів і те, що інтерфейс задовольняє їхні потреби. Низька частота повернень може свідчити про проблеми з утриманням користувачів.
Помилки (Errors)	Кількість і типи помилок, які виникають під час взаємодії користувача з додатком (наприклад, невдалі спроби виконати дію, помилки навігації або технічні збої).	Помилки можуть вказувати на складні або заплутані аспекти інтерфейсу, де користувачі не можуть досягти бажаного результату або стикаються з проблемами через поганий дизайн чи технічні проблеми.
Частота повернення (Retention Rate)	Відсоток користувачів, які повертаються до додатку після першого використання протягом певного часу (день, тиждень, місяць).	Висока частота повернень свідчить про те, що додаток задовольняє користувачів і його інтерфейс є зручним та функціональним. Низький рівень повернень може свідчити про незадоволення користувачів або про те, що інтерфейс не виконав їхніх очікувань.

Для збору поведінкових даних використовуються різноманітні аналітичні інструменти, такі як Google Analytics, Yandex Metrika, Hotjar, Mixpanel, Firebase та інші. Ці сервіси дозволяють відстежувати дії користувачів на всіх етапах взаємодії з додатком, зберігаючи інформацію про кліки, час на сторінках, сесії, помилки та частоту повернень.

Аналіз поведінкових даних можна здійснювати кількома способами:

- Кількісний аналіз: Статистичне вивчення показників (наприклад, середній час сесії або середня кількість кліків), яке допоможе виявити середні значення та тренди в поведінці користувачів.
- Теплові карти (Heatmaps): Використання інструментів типу Hotjar для побудови теплових карт, які показують найчастіше використовувані елементи інтерфейсу і зони, які залишаються без уваги.
- Воронки конверсій (Conversion Funnels): Виявлення ключових точок взаємодії, на яких користувачі найчастіше покидають додаток. Це дозволяє знайти «вузькі місця» в інтерфейсі.
- Сегментація користувачів: Розподіл користувачів на групи за певними критеріями (наприклад, за частотою використання додатку чи демографічними характеристиками) для більш точного аналізу потреб різних груп.

Виявлення патернів.

1. Зони з високою активністю та «сліпі зони». Патерни кліків можуть показати, які елементи інтерфейсу користувачі найчастіше використовують, і навпаки, які елементи залишаються непоміченими. Це допомагає визначити, чи потрібне перенесення важливих функцій на більш помітні місця.

2. Поведінка користувачів у залежності від сесій. Якщо користувачі часто відкривають додаток на короткий час, це може свідчити про те, що інтерфейс не допомагає швидко виконати завдання. Це може вимагати перегляду навігації або спрощення ключових функцій.

3. Аналіз помилок та відмов. Патерни помилок допоможуть визначити частини інтерфейсу, де користувачі стикаються з труднощами. Це можуть бути складні для розуміння інструкції або некоректні реакції системи. Виявлення таких проблемних місць дозволить удосконалити дизайн або функціональність.

4. Відстеження частоти повернень. Користувачі, які часто повертаються до додатку, вказують на те, що інтерфейс ефективний і відповідає їхнім потребам. Аналіз таких користувачів може допомогти виявити найуспішніші частини інтерфейсу, які можна масштабувати на інші аспекти.

Таким чином, аналіз поведінкових даних користувачів дозволяє розробникам отримати чітке уявлення про те, як їхній інтерфейс використовується в реальних умовах. Виявлення патернів поведінки допомагає знаходити проблеми, удосконалювати зручність і ефективність інтерфейсів, що зрештою покращує загальний користувацький досвід та підвищує залученість. Регулярний збір та аналіз цих даних є важливим кроком у процесі постійної оптимізації інтерфейсу.

### Математичні моделі та алгоритми для оптимізації інтерфейсів додатків на основі поведінкових даних користувачів

Для оптимізації інтерфейсів додатків на основі поведінкових даних користувачів можна розробити кілька математичних моделей та алгоритмів. Вони допоможуть визначити, як зміни в інтерфейсі впливають на досвід користувачів, і дозволять автоматизувати процес удосконалення дизайну.

#### 1. Модель оцінки зручності інтерфейсу

Мета: Визначити, як зміни в інтерфейсі впливають на зручність використання.

Основні змінні:

$T_{task}$  – середній час, витрачений на виконання завдання.

$C_{errors}$  – кількість помилок користувачів.

$S_{success}$  – відсоток користувачів, які успішно завершили завдання.

$P_{effort}$  – кількість кліків або кроків, необхідних для виконання завдання.

Модель:

Функція оцінки зручності може бути представлена як:

$$U(x) = w_1 T_{task} + w_2 C_{errors} + w_3 S_{success} + w_4 P_{effort},$$

де  $w_1, w_2, w_3, w_4$  – вагові коефіцієнти, що відповідають за важливість кожного з факторів.

Оптимізація: Мета – мінімізувати  $U(x)$ , де  $x$  – це параметри інтерфейсу (наприклад, розташування кнопок, розміри елементів).

#### 2. Алгоритм кластеризації користувачів на основі поведінки

Мета: Розділити користувачів на групи за схожими поведінковими патернами, щоб адаптувати інтерфейс для різних категорій.

Змінні:

- $p_1, p_2, \dots, p_n$  – поведінкові метрики користувачів (час взаємодії, кількість кліків, сесії).
- $K$  – кількість груп (кластерів) користувачів.

Алгоритм:

Використовуємо метод **k-середніх** (k-means) для кластеризації користувачів за поведінковими метриками:

1. Вибираємо випадкові центроїди  $C_1, C_2, \dots, C_k$ .
2. Визначаємо відстань між кожним користувачем та центроїдами за метриками поведінки:

$$d(u, C_k) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i^u - p_i^{C_k})^2}.$$

3. Користувачі групуються навколо найближчого центроїда.
4. Оновлюємо центроїди як середні значення в кожному кластері і повторюємо процес до збіжності.

Результат: Отримуємо групи користувачів із подібними поведінковими патернами, що дозволяє адаптувати інтерфейс під потреби кожної групи.

### 3. Модель прогнозування поведінки користувачів

Мета: Прогнозувати, як зміни в інтерфейсі вплинуть на поведінку користувачів.

Модель:

Для прогнозування поведінки можна використовувати регресійні моделі, зокрема лінійну регресію або нейронні мережі.

Лінійна регресія:

Залежність між змінами в інтерфейсі та поведінковими метриками можна описати рівнянням:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \epsilon,$$

де:

- $y$  – результативний показник (наприклад, час у додатку).
- $x_1, x_2, \dots, x_n$  – зміни в інтерфейсі (розмір кнопок, розташування елементів).
- $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  – коефіцієнти моделі.
- $\epsilon$  – похибка.

Нейронна мережа може мати кілька шарів, де вхідні параметри – зміни в інтерфейсі, а вихід – прогнозовані метрики поведінки користувачів.

Результат: Прогнозування, як зміни в інтерфейсі вплинуть на взаємодію користувачів (наприклад, час використання додатку або кількість конверсій).

### 4. Алгоритм А/В-тестування

Мета: Порівняти дві версії інтерфейсу (А та В) для визначення, яка з них краща для користувачів.

Алгоритм:

1. Розподіл: Користувачів випадково розподіляють на дві групи – одну, що використовує інтерфейс А, і іншу, що використовує інтерфейс В.
2. Збір даних: Збираються поведінкові метрики для обох версій (конверсії, час взаємодії, кількість помилок).
3. Статистичний аналіз: Використовується t-тест або Z-тест для порівняння результатів між двома групами:

$$t = \frac{\bar{X}_A - \bar{X}_B}{\sqrt{\frac{s_A^2}{n_A} + \frac{s_B^2}{n_B}}},$$

де:

- $\bar{X}_A, \bar{X}_B$  – середні значення метрик для груп А і В.
- $s_A^2, s_B^2$  – дисперсія результатів для обох груп.
- $n_A, n_B$  – кількість користувачів у групах.

Результат: Вибирається версія інтерфейсу, яка показала кращі результати за ключовими показниками.

### 5. Модель оптимізації за допомогою градієнтного спуску

Мета: Знайти оптимальні параметри інтерфейсу, які мінімізують функцію втрат, що враховує негативні поведінкові метрики (помилки, час на виконання завдання).

Функція втрат:

$$L(x) = \alpha T_{task}(x) + \beta C_{errors}(x) - \gamma S_{success}(x),$$

де:

$\alpha, \beta, \gamma$  – ваги, що відповідають важливості кожного з показників.

Алгоритм:

1. Ініціалізуємо випадкові значення параметрів інтерфейсу  $x_0$ .
2. Обчислюємо градієнт функції втрат:

$$\nabla L(x) = \frac{\partial L}{\partial x}$$

3. Оновлюємо параметри інтерфейсу за правилом градієнтного спуску:

$$x_{t+1} = x_t - \eta \nabla L(x_t)$$

де  $\eta$  – швидкість навчання.

4. Повторюємо процес до досягнення мінімуму функції втрат.

Результат: Оптимальні параметри інтерфейсу, які зменшують помилки та час на виконання завдань.

Запропоновані математичні моделі та алгоритми дозволяють аналізувати поведінкові дані користувачів і застосовувати їх для оптимізації інтерфейсів додатків. Від кластеризації користувачів до А/В-тестування та градієнтного спуску – ці підходи забезпечують систематичне вдосконалення інтерфейсів, підвищуючи задоволеність та залученість користувачів.

### Критерії якості інтерфейсів та шляхи їх досягнення

Для того, щоб обрана модель була максимально ефективною в тій чи іншій галузі важливо визначити критерії якості інтерфейсів та шляхи їх досягнення (табл. 2). Це допоможе встановити чіткі цілі та методи оптимізації дизайну і взаємодії, які будуть ефективними та зручними для користувачів.

Таблиця 2

### Шляхи досягнення якості інтерфейсів

Спосіб	Що робити	Як це покращує
Збір і аналіз поведінкових даних	Використовувати інструменти аналітики (Google Analytics, Hotjar, Яндекс Metrica) для збору даних про поведінку користувачів в додатку: кліки, час сесій, конверсії.	Допомагає зрозуміти, де користувачі стикаються з проблемами, і оптимізувати інтерфейс під їхні реальні дії.
Юзабіліті-тестування (Usability Testing)	Регулярно проводити тести з реальними користувачами, спостерігаючи за їх взаємодією з інтерфейсом.	Виявляє проблемні місця в дизайні та функціоналі, даючи змогу швидко реагувати на потреби користувачів.
А/В-тестування	Тестувати різні версії інтерфейсу (дизайн кнопок, розміщення елементів) і вимірювати вплив на показники ефективності.	Дозволяє точно визначити, які зміни краще впливають на досвід користувача.
Ітеративний підхід до дизайну	Постійно вдосконалювати дизайн і функціональність на основі зворотного зв'язку від користувачів.	Швидка адаптація до нових вимог і потреб користувачів.
Оптимізація продуктивності	Поліпшити технічні аспекти додатка (зменшення часу завантаження, покращення коду)	Збільшує швидкість додатку, роблячи користувацький досвід комфортнішим.
Врахування принципів доступності	Забезпечити відповідність інтерфейсу стандартам доступності (WCAG), додати альтернативні способи взаємодії для людей з обмеженими можливостями.	Додає інклюзивність і розширює коло користувачів [7-8].

Для досягнення високої якості інтерфейсів додатків важливо поєднувати кілька підходів, зокрема збір поведінкових даних, постійне тестування з реальними користувачами та технічну оптимізацію. Визначення чітких критеріїв якості допомагає краще оцінити успіх змін та створити комфортний і привабливий продукт для користувачів.

### Перспективи та виклики впровадження моделей оптимізації інтерфейсів

Дослідження в цьому напрямку показують, що дана тема має багато як обмежень так і перспективних напрямків розробки. Розглянемо основні виклики впровадження.

1. Обробка великих обсягів даних. Впровадження моделей оптимізації інтерфейсів, що базуються на поведінкових даних, вимагає обробки величезної кількості інформації про користувачів (кліки, час на сторінках, частота повернень). Одним із головних викликів є ефективна обробка та зберігання таких обсягів даних без зниження продуктивності додатка. Використання методів великих даних (Big Data) є необхідним, але вимагає значних технічних ресурсів, що можуть бути недоступні для всіх компаній.

2. Конфіденційність та безпека даних. Збір і аналіз поведінкових даних користувачів викликають серйозні питання щодо конфіденційності та захисту особистої інформації. Забезпечення відповідності до законів, таких як GDPR, є важливим аспектом, оскільки це визначає, як дані збираються, зберігаються та використовуються. Ризик порушення безпеки даних може підштовхувати компанії до впровадження додаткових заходів захисту, що збільшує вартість таких рішень.

3. Інтеграція з існуючими системами. Багато організацій вже мають встановлені системи аналітики та обробки даних, тому впровадження нових алгоритмів для оптимізації інтерфейсів може вимагати складної інтеграції. Проблеми сумісності, відсутність стандартизації та складність масштабування нових рішень є серйозними викликами при інтеграції нових алгоритмів у вже існуючі системи додатків.



4. Час навчання та оптимізації моделей. Для алгоритмів машинного навчання, зокрема нейронних мереж, потрібно багато часу та обчислювальних ресурсів для навчання. Якщо система має швидко реагувати на зміни в поведінці користувачів, тривалий період навчання моделей може стати суттєвим бар'єром. Підтримка ефективної роботи моделей у реальному часі залишається однією з технічних проблем.

5. Адаптація під індивідуальні потреби користувачів. Хоча алгоритми можуть створювати персоналізовані інтерфейси, не всі користувачі однаково взаємодіють з додатками. Надмірна персоналізація може призвести до складності інтерфейсу або навіть до втрати його універсальності. Знайти баланс між універсальністю та персоналізацією інтерфейсів є важливим викликом для розробників.

Незважаючи, на досить великий список обмежень і викликів з якими стикаються науковці дана тема має перспективи, які сформовані на основі сучасного стані розвитку та прогресу.

Перспективи подальших досліджень.

1. Розвиток гібридних моделей. Поєднання різних підходів, таких як глибокі нейронні мережі та традиційні алгоритми оптимізації, може дозволити отримати кращі результати в адаптації інтерфейсів. Гібридні моделі, що використовують одночасно кілька методів аналізу поведінкових даних, зможуть враховувати більшу кількість змінних і краще реагувати на зміни в поведінці користувачів.

2. Розробка мультимодальних адаптивних інтерфейсів. Дослідження можливостей створення адаптивних інтерфейсів, що реагують не тільки на поведінкові дані, але й на контекст використання (наприклад, місце, час, пристрій), можуть значно покращити якість взаємодії користувача з додатком. Використання датчиків і сенсорних систем для адаптації інтерфейсів відкриває нові перспективи для інтеграції різних типів даних.

3. Етичні питання та захист даних. З огляду на зростаюче використання поведінкових даних, важливо розробляти нові підходи до забезпечення конфіденційності та безпеки даних користувачів. Дослідження в цьому напрямі можуть допомогти впровадити більш ефективні механізми захисту даних без погіршення якості адаптації інтерфейсів.

4. Автоматизація процесів збору та аналізу даних. Подальший розвиток автоматизованих систем збору поведінкових даних дозволить знизити витрати на аналітику та покращити точність отриманих результатів. Системи, що автоматично збирають і аналізують дані, а потім адаптують інтерфейси у реальному часі, є перспективним напрямком для покращення користувацького досвіду.

Загалом, подальші дослідження мають бути спрямовані на покращення ефективності алгоритмів оптимізації, збільшення захисту даних та забезпечення гнучкості систем при адаптації інтерфейсів до змін у поведінці користувачів.

### Висновки

У статті розглянуто різноманітні моделі та алгоритми для оптимізації інтерфейсів додатків, що базуються на аналізі поведінки користувачів. На основі проведеного дослідження можна зробити кілька ключових висновків.

По-перше, інтеграція алгоритмів машинного навчання, таких як нейронні мережі та навчання з підкріпленням, дозволяє автоматизувати адаптацію інтерфейсів до потреб користувачів в реальному часі. Ці підходи покращують не лише ефективність використання інтерфейсу, але й його персоналізацію, що сприяє підвищенню задоволення користувачів і залученості до додатка.

По-друге, важливим аспектом є використання поведінкових даних для сегментації користувачів і створення адаптивних інтерфейсів, що відповідають потребам різних груп користувачів. Це підвищує точність адаптації та дозволяє створювати інтерфейси, які найкраще відповідають конкретним поведінковим патернам, що підтверджують дослідження кластеризації та поведінкової аналітики.

Нарешті, майбутні дослідження мають зосередитися на подальшому вдосконаленні алгоритмів, що дозволяють не тільки адаптувати інтерфейси під поведінку користувачів, але й передбачати їхні майбутні потреби, забезпечуючи максимально інтуїтивний і комфортний користувацький досвід.

Таким чином, моделі та алгоритми для оптимізації інтерфейсів на основі поведінкових даних є ключовим напрямом розвитку, що відкриває нові можливості для підвищення якості мобільних і веб-додатків.

### Список використаної літератури

1. Abrahão S., Insfran E., Sluÿters A. Model-based intelligent user interface adaptation: challenges and future directions. *Software and Systems Modeling*. № 20. 2021. P. 1335–1349.
2. Tao K., Edmunds P., Mobile APPs and Global Markets. *Theoretical Economics Letters*. № 8. 2018. P. 1510–1524.
3. Zhou J., Tang, Z., Zhao M., Ge X., Zhuang F., Zhou M., Xiong H. Intelligent exploration for user interface modules of mobile app with collective learning. *In Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*. 2020. p. 3346–3355.
4. Keselj A, Milicevic M, Zubrinic K, Car Z. The application of deep learning for the evaluation of user interfaces. *Sensors*. No. 22(23). 2022. P. 9336.

5. Martín G., Fernández-Isabel A., Martín de Diego A. A survey for user behavior analysis based on machine learning techniques: current models and applications. *Applied Intelligence*. № 51(3). 2021. P. 6029–6055.

6. Liang L., Ke Y. User behavior data analysis and product design optimization algorithm based on deep learning. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 2023. Retrieved from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12008-023-01652-7#citeas>

7. Кулібаба С., Поперешняк С. Засіб комунікації з голосовим помічником і підвищеним рівнем безпеки. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. № 4 (73). 2021. С. 87–100.

8. Kulibaba S., Popereshnyak S., Shcheblanin Y., Kurchenko O., Mazur N. (2022) Advanced Communication Model with the Voice Control and the Increased Security Level Cybersecurity. *Information and Telecommunication Systems*. № 3288 (1). 2022. P. 64–72.

#### References

1. Abrahão S., Insfran E., Sluÿters A. (2021) Model-based intelligent user interface adaptation: challenges and future directions. *Software and Systems Modeling*, no. 20, pp. 1335–1349.

2. Tao K., Edmunds P. (2018) Mobile APPs and Global Markets. *Theoretical Economics Letters*, no. 8, pp. 1510–1524.

3. Zhou J., Tang, Z., Zhao M., Ge X., Zhuang F., Zhou M., Xiong H. (2020) Intelligent exploration for user interface modules of mobile app with collective learning. *In Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, p. 3346–3355.

4. Keselj A, Milicevic M, Zubrinic K, Car Z. (2022) The application of deep learning for the evaluation of user interfaces. *Sensors*, no. 22(23), pp. 9336.

5. Martín G., Fernández-Isabel A., Martín de Diego A. (2021) A survey for user behavior analysis based on machine learning techniques: current models and applications. *Applied Intelligence*, no. 51(3), pp. 6029–6055

6. Liang L., Ke Y. (2023) User behavior data analysis and product design optimization algorithm based on deep learning. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. Retrieved from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12008-023-01652-7#citeas>

7. Kulibaba S., Popereshniak S. (2021) Zasiб komunikatsiyi z holosovym pomichnykom i pidvyshchenym rivnem bezpeky. [A means of communication with a voice assistant and an increased level of security]. *Telekomunikatsiyi ta informatsiyi tekhnolohiyi*, no 4 (73), pp. 87–100. [in Ukrainian].

8. Kulibaba S., Popereshnyak S., Shcheblanin Y., Kurchenko O., Mazur N. (2022) Advanced Communication Model with the Voice Control and the Increased Security Level Cybersecurity. *Information and Telecommunication Systems*, no. 3288 (1), pp. 64–72.

**М. Ю. ОВЧИННИКОВ**асистент кафедри кібербезпеки  
Національний університет «Одеська юридична академія»  
ORCID: 0009-0009-8221-7193**В. М. СЛАТВІНСЬКА**доктор філософії, асистент кафедри кібербезпеки  
Національний університет «Одеська юридична академія»  
ORCID: 0000-0002-6082-981X

## ТЕХНІЧНИЙ ТА НОРМАТИВНО-ПРАВОВИЙ АСПЕКТИ ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ НА РИНКУ АУДІО-ВІЗУАЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ

У статті детально досліджуються виклики та потенційні рішення у сфері захисту інтелектуальної власності на аудіовізуальні продукти. Мета цієї статті – дослідити різні аспекти захисту прав інтелектуальної власності на ринку аудіовізуальної продукції України, зосередившись на її технічних та юридичних аспектах. Автори прагнуть надати повний огляд наявних методів та інструментів, які використовуються для захисту авторських прав на аудіовізуальні твори, а також розглянути їхню ефективність на практиці.

Дослідження виявило, що Україна має відповідні правові норми, які регулюють захист інтелектуальної власності на аудіовізуальну продукцію, зокрема Закон України «Про авторське право і суміжні права». Однак, на практиці існують значні проблеми, пов'язані з відсутністю сучасної інфраструктури, недостатньою інформованістю громадян, слабкими інститутами контролю та виконання права. Автори статті надають детальний опис відомих існуючих методів стеганографії, які використовуються для захисту цифрових аудіо та відеофайлів, таких як використання цифрового водяного знака (ЦВЗ) та інших стеганографічних технік. Вони також розглядають можливості використання глибокого навчання та нейронних мереж, які надають нові перспективи щодо стійкості ЦВЗ до різних атак.

Стаття дійшла висновку, що ефективний захист інтелектуальної власності на ринку аудіовізуальної продукції України вимагає комплексного підходу, який включатиме як технічні, так і юридичні заходи. Необхідним є розвиток інформаційних систем, які дозволять відстежувати та припиняти піратство, а також підвищення рівня обізнаності населення щодо прав інтелектуальної власності. Автори також акцентують на значенні міжнародної співпраці та імплементації міжнародних стандартів у національне законодавство, щоб створити єдиний, взаємовигідний та конкурентоспроможний ринок.

Під час дослідження було виявлено, що деякі методи стеганографії, такі як використання ЦВЗ на основі реверберації, можуть бути досить вразливими до атак, які націлені на придушення цієї техніки. Тому важливо розробляти більш надійні та універсальні підходи, які були б стійкими до різного роду атак.

**Ключові слова:** аудіовізуальні твори, авторське право, стеганографія, цифровий водяний знак, нейронні мережі, захист інформації, комп'ютерні науки, методика ревербації.

**M. YU. OVCHINNIKOV**Assistant at the Department of the Cybersecurity  
National University "Odesa Law Academy"  
ORCID: 0009-0009-8221-7193**V. M. SLATVINSKA**PhD, at the Department of the Cybersecurity  
National University "Odesa Law Academy"  
ORCID: 0000-0002-6082-981X

## TECHNICAL AND REGULATORY ASPECTS PROTECTION OF INTELLECTUAL PROPERTY IN THE AUDIO-VISUAL MARKET

The article underscores the significance of a robust legal framework capable of adapting to the unique challenges posed by the digital age. Despite some progress, substantial gaps and inconsistencies persist in the legal landscape, hindering the effective defense of intellectual property rights in the audio-visual sector. This domain is paramount as the industry contributes significantly to Ukraine's economy, creating employment opportunities and generating substantial revenue.

The study delves into the intricacies of protecting multimedia data, focusing on digital watermarking technology, which embeds hidden information within audio and video files. The relevance of such technology is highlighted by the prevalence of piracy and unauthorized distribution that threaten the financial stability of content creators and distributors.

*The article explores the intersection of law and technology, emphasizing the need for a comprehensive approach to preserve the rights of authors and producers in the digital era.*

*The legal dimension of the issue is outlined, highlighting the rights of authors and producers under Ukrainian copyright law. The exclusive rights to reproduce, distribute, and communicate audio-visual works to the public are emphasized, as well as the personal non-property rights, such as the right to be recognized as the author and the right to protect the work from distortion. Protecting intellectual property rights involves several key stages and stakeholders, encompassing civil, administrative, and criminal legal measures.*

*The article presents a technical analysis of digital signal processing, specifically the discretization and quantization of analogue signals to produce digital ones. This is essential for understanding the mechanisms of digital watermarking, which rely on the subtle alteration of the digital signal to incorporate hidden data.*

*A notable steganographic technique discussed is the use of reverberation. This phenomenon is a natural byproduct of sound waves reflecting off enclosed surfaces, creating an echo effect. The article suggests modulating the time delay between the original signal and the reverberation to encode data. However, the authors concede that this approach is susceptible to deliberate attempts to suppress reverberation, such as noise reduction algorithms, which can inadvertently erase the embedded watermark.*

*Another method explored is the Gaussian model, which, while theoretically promising for embedding and extracting one bit of information, faces practical limitations due to the complexity of real-world audio signals. The article acknowledges the challenges inherent in creating a universally applicable solution for digital watermarking and the necessity of continual research to improve the resilience of these methods against intentional attacks and unauthorized alterations.*

*In conclusion, the article underscores the critical nature of protecting intellectual property in the audio-visual market, emphasizing the interplay between legal frameworks and technological advancements. It calls for a multidisciplinary approach to tackle the evolving challenges of digital piracy and ensure a thriving and innovative industry that can attract foreign investment and contribute positively to Ukraine's international reputation.*

**Key words:** audiovisual works, copyright, steganography, digital watermark, neural networks, information security, computer science, reverberation technique.

### Постановка проблеми

Сутність проблеми захисту прав інтелектуальної власності на ринку аудіовізуальної продукції в Україні полягає у відсутності комплексної та ефективної правової бази, яка б адекватно реагувала на унікальні виклики, що постають перед цим сектором. Зі стрімким розвитком технологій та легкістю доступу до цифрового контенту захист аудіовізуальної продукції від піратства, несанкціонованого розповсюдження та неправомірного використання стає дедалі складнішим. Незважаючи на певний прогрес, досягнутий за останні роки, все ще існують значні прогалини та неузгодженості в нормативно-правовому полі, які перешкоджають ефективному захисту прав інтелектуальної власності на аудіовізуальному ринку. Тому вивчення цього питання є вкрай важливим, оскільки аудіовізуальна індустрія робить значний внесок в економіку України, працевлаштовуючи тисячі людей та генеруючи мільярди доларів доходу. Захист прав інтелектуальної власності в цьому секторі не лише забезпечує фінансову стабільність авторів, виробників та дистриб'юторів, але й сприяє створенню здорового та конкурентного ринкового середовища, яке заохочує інновації та інвестиції. Більше того, оскільки Україна продовжує інтегруватися у світову економіку, ефективний захист прав інтелектуальної власності на аудіовізуальному ринку стає все більш важливим для створення репутації надійного партнера та залучення іноземних інвестицій.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Тема захисту мультимедійних даних обговорюється у наукових колах досить давно. Публікації присвячені питанням та методам захисту авторських прав на аудіо та відео продукцію постійно оновлюються й автори цих публікацій пропонують різноманітні вдосконалення вже наявних методів або принципово нові. В основному все зводиться до застосування методів стеганографії для розміщення цифрового водяного знака (ЦВЗ) в мультимедійних даних.

Інтерес викликає стаття, присвячена сталій системі водяних знаків для перезапису звуку з урахуванням глибокого навчання [8]. Дослідники вивчають проблему вбудовування стійких цифрових водяних знаків під час перезапису звуку. ЦВЗ на аудіо широко використовуються для відстеження джерела витоку даних. Наприклад, один і той же аудіофайл, який використовують різні відділи однієї організації або різні люди позначається різними ЦВЗ. Це дає змогу звизити коло при пошуку джерела витоку даних. Надійність водяного знака визначає можливість відстеження алгоритму приховування інформації. З розвитком цифрових технологій перезапис звуку (Audio Recording, AR) став ефективним та потайним способом крадіжки секретів. Процес AR може значно зруйнувати сигнал водяного знака, зберігаючи вихідний зміст. Це ставить нову вимогу до звукових водяних знаків бути стійкими до спотворень AR. На жаль, жоден з існуючих алгоритмів не здатний ефективно протистояти атакам AR через складність цього процесу. Щоб вирішити цю проблему, у цій статті пропонується DeAR (A Deep-Learning-Based Audio Re-recording Resilient Watermarking), система водяних знаків, стійка до перезапису звуку, що базується на глибокому навчанні. Розвиток нейромереж привів до виявлення DNN Watermarking (deep neural network

watermarking) – технологія влаштування ЦВЗ в медіафайли з використанням глибокої нейронної мережі. Автори спробували застосувати дану технологію для аудіофайлів. Вони розробили систему глибокого навчання для аудіо, яка дозволяє ефективно впроваджувати та отримувати сигнал водяного знака. Крім того, щоб протистояти атакам AR, автори ретельно проаналізували спотворення, що виникають у процесі AR, та розробили відповідний шар спотворень для взаємодії з запропонованою структурою водяних знаків. Великі експерименти показують, що запропонований алгоритм здатний протистояти як звичайним спотворенням електронного каналу, а й спотворенням AR. При високій якості впровадження (SNR=25,86 дБ) та відстані перезапису 20 см алгоритм досягає середньої точності відновлення бітів 98,55% [8].

Автор іншої статті Світловський О.В. [9] провів систематизацію моделей та алгоритмів створення ЦВЗ для аудіофайлів. Автором розроблено моделі та алгоритми створення цифрових водяних знаків у звукових форматах. Проведено дослідження для різних форматів представлення даних, а також досліджено можливості їх застосування в аудіофайлах. Розглянуто методики та результати аналізу статистичної непомітності та можливості відновлення вбудованої послідовності ЦВЗ стороннім спостерігачем для оцінки якості ЦВЗ в об'єктах звукових форматів. Також досліджено побудову та використання універсальних перетворень стиснення для стеганографічного вбудовування ЦВЗ в об'єкти-контейнери різних типів з мінімальним рівнем дисперсії спотворень на основі штучних двошарових нейронних мереж прямого поширення, що дозволяє підвищити ефективність та захищеність передачі прихованих даних каналами. Обґрунтовано доцільність такого методу. Автором розроблено спеціальне математичне та програмне забезпечення для створення цифрових водяних знаків для аудіоданих.

Також можна згадати роботи, які присвячені дослідженню стійкості різних алгоритмів стеганографії: Voloshynovskiy S. [10], Popa R. [11], Johnson N. F. [12].

#### Формулювання мети дослідження

Мета статті – визначити способи захисту об'єктів інтелектуальної власності на аудіовізуальну продукцію з технічної та юридичної точок зору.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Стаття 6 Закону України «Про обов'язковий примірник документів» вказує: «Аудіовізуальною продукцією є кіно-, відео-, фото-, фонодокументи» [1]. Натомість звужуємо розгляд зазначених об'єктів авторського права до аудіо-. Тобто музичні твори (з текстом або без тексту), аудіовізуальні твори є об'єктами авторського права згідно зі ст. 430 Глави 36 Цивільного кодексу України [2].

Як правило, згідно зі статтею 41 Конституції України: «Кожен має право володіти, користуватися і розпоряджатися своїм майном, що є результатом інтелектуальної і творчої діяльності» [3].

Водночас виключний перелік суб'єктів-авторів аудіовізуальних творів визначено у частині 16 статті 1 Закону України «Про авторське право і суміжні права» [4]. Тобто йдеться про власників майнових та особистих немайнових прав на аудіовізуальні твори.

Зокрема майновими правами на аудіовізуальний твір є: «Право на виготовлення примірників аудіовізуального твору, право на продаж, здавання в оренду, дарування примірників аудіовізуального твору, право на показ аудіовізуального твору публіці, право на передачу аудіовізуального твору в ефір або по кабелю, право на доведення аудіовізуального твору до загалу таким чином, що кожен користувач може мати доступ до нього в будь-який час і в будь-якому місці за власним вибором, право на створення нового твору на основі існуючого, право на субтитрування, озвучення (дублювання), переклад» [4]. При цьому майнові права на аудіовізуальний твір зазвичай переходять до продюсера з моменту створення твору або можуть залишатися у авторів за договором відповідно до ч. 2 тієї ж статті.

Особистими немайновими правами авторів є: «Право визнаватися автором твору, право на використання твору під своїм справжнім ім'ям або псевдонімом, право на захист твору від будь-якого викривлення, скорочення або іншої зміни, право на оприлюднення твору, право на отримання винагороди за використання твору» [4]. Особисті немайнові права залишаються у авторів і не можуть бути передані згідно ч. 2 тієї ж статті.

Стосовно використання аудіовізуального твору то обов'язково потрібна згода автора або правовласника. Натомість можливі і винятки, передбачені законом [4].

Під захистом авторських прав на аудіовізуальні твори слід розуміти комплекс заходів, спрямованих на охорону прав авторів та інших суб'єктів авторського права на аудіовізуальні твори.

При цьому захист авторських прав на аудіовізуальні твори відбувається 3 способами. Зокрема цивільно-правовими, адміністративно-правовими та кримінально-правовими. Цивільно-правові способи захисту включають в себе визнання права, відшкодування шкоди, зупинення порушення, вилучення контрафактної продукції [5, с. 115]. Адміністративно-правові способи захисту – це: накладення штрафу, конфіскація контрафактної продукції. До кримінально-правових способів захисту належать: позбавлення волі, штраф, обмеження волі.

Серед відомих юридичних методів захисту авторських прав на аудіовізуальні твори можна назвати державну реєстрацію авторських прав, яка не є обов'язковою, але з офіційним підтвердженням автора і дати створення твору, використання знака авторського права, укладення договору і судовий захист.

Тобто процес захисту об'єктів інтелектуальної власності на ринку аудіовізуальної продукції в Україні включає кілька ключових етапів та зацікавлених сторін, що зображено на Рис. 1:



**Рис. 1. Процес захисту інтелектуальної власності аудіовізуального продукту**

*Джерело: авторська розробка*

Звернемо увагу, як видно з рис. 1 процес захисту інтелектуальної власності аудіовізуального продукту складається із 5 взаємопов'язаних кроків.

Зокрема, спочатку творець контенту або продюсер має на меті розробити аудіовізуальний продукт, як фільм, телевізійне шоу або рекламний ролик. А вже після того, як продукт завершено, творець повинен зареєструвати його у відповідних органах, щоб встановити право власності та захистити права інтелектуальної власності.

Загальновідомо, що в Україні захист авторських прав автоматично поширюється на оригінальні твори, включаючи аудіовізуальну продукцію. Проте реєстрація авторського права забезпечує додатковий правовий захист і полегшує реалізацію прав. Реєстрацією авторських прав на аудіовізуальні твори займається Державне підприємство «Український інститут інтелектуальної власності» (УКРПАТЕНТ). Згідно з пунктом 4 Постанови Кабінету міністрів України від 18.07.1995 № 532 «Про державну реєстрацію прав автора на твори науки, літератури і мистецтва»: «Міністерство культури забезпечує на базі Державного фонду фільмів Національного центру Олександра Довженка опрацювання матеріалів, поданих у зв'язку з державною реєстрацією прав автора на аудіовізуальні твори, та окреме, недоступне для запозичення, зберігання позитивних кінокопій і вихідних матеріалів аудіовізуальних творів» [6].

Якщо аудіовізуальний продукт містить будь-які відмітні елементи, такі як логотип або брендинг, творець може також захотіти зареєструвати торгову марку, щоб захистити інтелектуальну власність, пов'язану з цими елементами. Реєстрацією торгових марок займається Державна організація «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій» (УКРНОІВІ).

Відповідно до пункту 33 статті 1 Закону «Про медіа» [7] український аудіовізуальний ринок також має власний орган саморегулювання – Національну раду з питань телебачення і радіомовлення. Він розробляє та впроваджує галузеві стандарти, розглядає скарги та суперечки, а також здійснює моніторинг ефіру на предмет несанкціонованого використання об'єктів інтелектуальної власності.

Після того, як права інтелектуальної власності були створені та зареєстровані, творці та виробники повинні забезпечити дотримання цих прав, щоб запобігти їх порушенню. Це включає моніторинг ринку на предмет несанкціонованого використання, видачу листів з вимогою припинити порушення, подання судових позовів проти порушників та співпрацю з правоохоронними органами з метою вилучення контрафактної продукції.

Варто підкреслити, що Україна є членом кількох міжнародних організацій, що займаються питаннями захисту прав інтелектуальної власності, включаючи Всесвітню організацію інтелектуальної власності та Європейську патентну конвенцію. Це членство дозволяє Україні співпрацювати з іншими країнами з метою обміну передовим досвідом, координації зусиль у сфері правозастосування та захисту прав інтелектуальної власності на глобальному рівні.

У цьому процесі зацікавлені сторони, такі як творці контенту, продюсери, дистриб'ютори, мовники та юристи у сфері інтелектуальної власності, відіграють вирішальну роль у забезпеченні захисту та дотримання прав інтелектуальної власності на українському аудіовізуальному ринку.

Технічний захист авторських прав на аудіовізуальні твори – це комплекс заходів щодо захисту творів від несанкціонованого доступу, копіювання, розповсюдження та використання.

Питання юридичного захисту авторських прав тісно пов'язані з технічним захистом аудіовізуальної продукції. У цілому нині технічний захист об'єктів аудіовізуальної продукції полягає в розміщенні міток всередині файлу для ідентифікації правласника. Такі мітки повинні бути непомітними, стійкими до випадкової або навмисної зміни або видалення, а також легко розпізнаватись при необхідності ідентифікації. Крім того, враховуючи, що

більшість форматів зберігання аудіо та відео інформації піддаються стиску за допомогою різних алгоритмів, які використовують надмірність такого типу даних, обов'язково має дотримуватися цілісність авторських міток при компресії файлів.

Такі мітки повинні зберігатися й у разі копіювання звукового або відео файлу навіть у випадку, коли об'єкт копіювання знаходиться на відстані від запису і на копію додатково накладаються перешкоди, спотворення, шуми.

Стеганографія дозволяє розміщувати об'єкти з конфіденційною інформацією всередині якогось контейнера з даними таким чином, що сам факт присутності всередині контейнера якихось даних теж прихований. У нашому випадку контейнером виступає аудіо або відеофайл, а в якості прихованої інформації виступають дані про правовласника.

Таку приховану інформацію прийнято називати цифровим водяним знаком (ЦВЗ). Принцип вбудовування ЦВЗ у файл, що містить мультимедійні дані та виділення ЦВЗ з нього показано на Рис. 2:

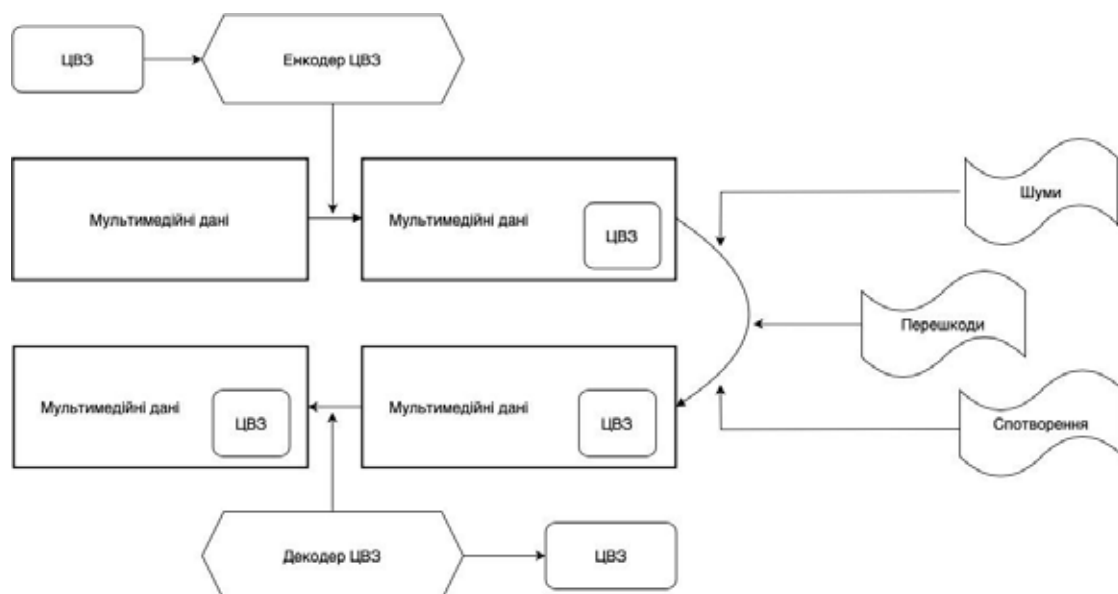


Рис. 2. Структурна схема роботи з ЦВЗ для мультимедійного файлу

Джерело: авторська розробка

**YouTube Content ID.** У деяких випадках підтвердити авторські права на аудіо або відео можна простим порівнянням. Саме так реалізовано захист авторських прав на майданчику найбільшого відео хостингу YouTube, який було створено у 2005 році та придбано компанією Google у 2006 році. І вже у 2007 році було розроблено та впроваджено систему цифрової ідентифікації контенту Content ID для захисту авторських прав на відео платформі YouTube [13, 14, 19]. Суть цієї системи полягає в порівнянні нових відео файлів, які завантажуються на платформу YouTube із завантаженими раніше. Порівняння відбувається за візуальною та аудіо складовою завантаженого файлу. Якщо коефіцієнт схожості вище заданих системою параметрів, система вважає відео таким, що порушує авторські права користувача, відео якого вже є в системі. Збіг може бути повним або частковим. Звичайно, можлива ситуація, коли відео завантажено на платформу раніше за правовласника, але система налаштована так, що не всі, хто завантажує відео є учасниками системи Content ID. Для того щоб користуватися її можливостями, необхідно відповідати низці вимог. Варто зважити і на те, що не всі правовласники користуються цією системою. Також, якщо користуватися послугами дистриб'юторів цифрового контенту, автори мають можливість включати або вимикати Content ID, а також робити винятки для деяких користувачів при включеному Content ID.

Загалом різних комбінацій умов може бути чимало. Система не ідеальна, крім того, порівняння вимагає від платформи багато обчислювальних ресурсів. Для оптимізації роботи Content ID в систему потрапляють лише відео, тривалість яких перевищує 30 секунд. Незважаючи на недоліки, система Content ID дозволяє в більшості випадків захистити особливо популярних авторів від копіювання їх творів усередині відео платформи.

Використання такого методу є допустимим в рамках окремо взятого сервісу, але не вирішує глобального завдання, якщо врахувати те, що тільки на YouTube щодня завантажується близько 4 мільйонів нових відео.

Для надійного захисту ЦВЗ у мультимедійних даних можна використовувати цифрові, криптографічні і стеганографічні методи та його комбінації.

**Теги ID3v2 для звукових файлів MP3.** Найпростіший спосіб розміщення ЦВЗ в мультимедійних даних має на увазі розміщення мітки безпосередньо в коді файлу або в його мета даних. Файли формату MP3 (скор. від

MPEG-1 Audio Layer III або MPEG-2 Audio Layer III) містять різні аудіодані, такі як звуки, звукові ефекти, музику та голосові записи. Згодом структура цих файлів змінювалася. В даний час можна виділити два основні компоненти MP3 файлу: ID3-тег і послідовність кадрів (фреймів). Структура формату чимось нагадує кіноплівку.

ID3-тег другої версії розміщується на початку файлу (у версії ID3v2.3, яка є найбільш поширеною на сьогоднішній день) або наприкінці файлу (у версії ID3v2.4) та містить різноманітну довідкову інформацію. Наприклад, для музичних композицій ID3 тег включає ім'я треку, альбому, виконавця та інші дані.

ID3 (від англ. IDentify MP3) – надзвичайно популярний формат тегів даних аудіофайлів. Теги ID3 підтримуються в iTunes, Windows Media Player, Winamp, YME, MusicMatch та апаратних програвачах, таких як iPod, Creative Zen, Toshiba Gigabeat та Sony Walkman. Тег ID3 є контейнером метаданих, який найчастіше використовується в поєднанні з форматом аудіофайлів MP3. Теги ID3 дозволяють передавати таку інформацію, як назва, виконавець, альбом, трек, рік, обкладинка або іншу інформацію про файл [15].

Таблиця 1

Структура вмісту файлу MP3

Область тега ID3v2	Фрейм тега ID3v2	Область заголовка тега ID3v2	Заголовок фрейму містить поля: Ідентифікатор, Розмір, Прапори
		Вміст фрейму тега	Метадані
	...	...	...
	Фрейм тега ID3v2	Область заголовка тега ID3v2	Заголовок фрейму містить поля: Ідентифікатор, Розмір, Прапори
		Вміст фрейму тега	Метадані
Область аудіо даних	Область фреймів (один або більше фреймів)	Фрейм MP3	Заголовок фрейма Аудіо дані
		...	...
		Фрейм MP3	Заголовок фрейма Аудіо дані

Джерело: авторська розробка.

Як показано у таблиці 1, файл MP3 може містити область тега ID3 з областю аудіоданих [15]. Тег ID3 складається з таких компонентів: заголовка, та одного або кількох кадрів різного змісту [16]. ID3v2 має змінну довжину і може розміщуватися як на початку файлу [v2.3], так і в кінці [v2.4]. Тег складається з кількох «фреймів», кожен з яких містить певні метадані. Наприклад, фрейм «TIT2» зберігає назву композиції. Максимальний розмір одного фрейма обмежений 16 МБ, а загальний розмір тега не може перевищувати 256 МБ. Текст у фреймах може бути закодований у форматах UTF-16 або UTF-8, а біт кодування вказує на тип текстового фрейма. Стандарт ID3v2 визначає 84 типи фреймів, але також допускає створення користувацьких фреймів програмами. Серед стандартних фреймів є ті, що використовуються для зберігання обкладинок альбомів, кількості ударів на хвилину, інформації про авторські права і ліцензії, текстів пісень, посилань та інших даних. Файл із тегом у форматі ID3v2 починається з символів ID3, які є частиною заголовка (Header) тега. Заголовок складається з 10 байт і містить поля, описані нижче. Порядок байтів у ID3v2 – big endian, а розмір записується у 7-бітових байтах, де старший біт завжди дорівнює 0.

Метадані, які містяться у файлі, можуть у явному вигляді містити інформацію про авторські права, але цього не достатньо, тому що такі дані легко змінити або видалити, використовуючи спеціальне програмне забезпечення. Варто враховувати і той факт, що з 23 квітня 2017 року, коли минув термін дії пов'язаних з MP3 патентів, цей формат став фактично форматом з відкритим вихідним кодом. Тобто технічно немає перешкод для зміни вмісту файлу. Але можна розмістити дані про правовласника потай, використовуючи популярні стеганографічні методи. Наприклад, у зображенні, яке розміщується в метаданих як обкладинка музичного альбому або фото автора твору, можна за допомогою LSB (Least Significant Bit) методу [17] розмістити приховану інформацію про автора. У тегу ID3v2 обкладинка альбому або фотографія автора зберігається у форматі двійкових даних усередині спеціального фрейму під назвою APIC (Attached Picture). Цей фрейм може містити зображення в різних графічних форматах, таких як: JPEG (image/jpeg), PNG (image/png), GIF (image/gif), хоча цей формат використовується рідше. Фрейм APIC включає кілька полів, серед яких: MIME-тип зображення (наприклад, image/jpeg чи image/png), який вказує на формат файлу зображення; тип зображення – байт, що означає, що саме зображено (наприклад, обкладинка переднього плану, обкладинка заднього плану, іконка, логотип і т.д.); опис – текстове поле, що містить опис зображення (опціонально); власне дані зображення – двійкові дані, що представляють зображення у вибраному форматі (JPEG, PNG і т.д.). Така інформація буде непомітною. Враховуючи, що обмеження на розмір файлу, що завантажуються в тегах ID3v2 не накладаються, то розміщення повної інформації про автора виглядає цілком реально.



Даний метод застосовується для зображень формату PNG, GIF, BMP. Формати PNG і BMP не використовують стиснення, а формат GIF використовує стиснення без втрат. Варто зазначити, що формат BMP останнім часом майже не використовується, тому наявність такого файлу може викликати підозру. На жаль, метод LSB не застосовується до найбільш популярного графічного формату JPG через те, що цей формат використовує стиснення з втратами і при стисненні файлу будуть втрачені найменш значущі біти, що містять нашу приховану інформацію.

**Метод LSB.** Принцип роботи цього методу можна розглянути з прикладу 24-бітного растрового RGB-зображення. Одна точка зображення в цьому форматі кодується трьома байтами, кожен з яких відповідає за інтенсивність одного із трьох складових кольорів (рисунк 3).



Рис. 3. Палітра RGB

COLORREF – стандартний тип для представлення кольорів у Windows API. Використовується для визначення кольору RGB, та її значення зберігається у вигляді 32-бітного (4-байтного) числа. У форматі RGB використовується три канали: червоний (Red), зелений (Green) та синій (Blue), але у зворотному порядку, кожен з яких займає 1 байт (8 біт), що в сумі становить 3 байти (24 біти) на піксель. Старший байт (крайній зліва) зарезервованій і зазвичай не використовується, він дорівнює нулю, тому формат виглядає як 0x00BBGGRR. У деяких графічних форматах файлу, наприклад.png, четвертий байт – це альфа-канал (Alpha), який відповідає за прозорість. У цьому випадку колірна схема записується як RGBA.

При визначенні будь-якого RGB кольору, значення змінної типу COLORREF можна записати у шістнадцятковому вигляді так:

$$0x00bbggrr \quad (1)$$

де:

rr, gg, bb – значення інтенсивності відповідно до червоної, зеленої та синьої складових кольору. Максимальне їхнє значення – 0xFF.

Визначити змінну типу COLORREF можна так:

$$\text{COLORREF } C = \text{RGB} ( r, g, b ); \quad (2)$$

де:

COLORREF C – змінна типу COLORREF, яка буде містити значення кольору.

RGB – макрос, який використовується для створення значення COLORREF з трьох компонентів: червоного, зеленого та синього.

r, g, b – інтенсивність (в діапазоні від 0 до 255) відповідно червоної, зеленої та синьої складових визначається кольору C. Тобто яскраво-синій колір може бути визначений як (0,0,255), червоний як (255,0,0), яскраво-фіолетовий – (255,0,255), чорний – (0,0,0), а білий – (255,255,255).

В результаті ми отримаємо вже інший відтінок, що мало відрізняється від вихідного. Такі схожі кольори важко розрізнити навіть на великих ділянках заливки, хоча різниця буде помітна при детальному аналізі за окремими точками. Заміна двох молодших біт практично не вловлюється людським оком. При необхідності можна використовувати три розряди, що незначно вплине на якість зображення. Можна визначити корисний об'єм RGB-контейнера. Якщо використовуються два біти з восьми на кожен канал, то можна захопити три байти корисної інформації на кожен чотири пікселі зображення, що становить 25% від загального обсягу зображення. Таким чином, маючи файл зображення розміром 160 Кбайт (при такому обсязі це буде картинка досить гарної якості), можна приховати в ньому до 40 Кбайт довільних даних, так що неозброєним оком ці зміни будуть непомітні,

а це досить великий обсяг інформації, якщо врахувати, що один символ займає 1–2 байти (залежить від мови та кодування).

Також за допомогою методу LSB можна закодувати секретне повідомлення в аудіофрагменті. Тобто повідомлення конвертується в бінарний формат і далі відбувається ітерація елементів аудіофайлу, де для кожного елемента в масці нижніх бітів встановлюється відповідне бінарне значення повідомлення.

Аналізуючи отримані результати після застосування методу стеганографії LSB, можна відзначити, що закодоване повідомлення майже не вплинуло на частотні і спектральні характеристики аудіосигналу. Також під час прослуховування не було помічено спотворень [21].

У прикладі із зображенням у метатегах аудіофайлу формату MP3 поєднані два основні напрямки, якими розвивається сучасна стеганографія. Перше – використання особливостей файлових форматів та розміщення інформації безпосередньо у файловому коді, в даному випадку це тег ID3v2, який не чути при прослуховуванні музичного файлу. Хоча ці дані не є прихованими з точки зору стеганографії та їх існування не є секретом, але щоб відобразити картинку, додану в метатеги, потрібне спеціальне програмне забезпечення. Другий популярний напрям стеганографії – використання надмірностей, які мають мультимедійні формати даних, такі, як зображення, аудіо або відео.

**Цифрове оброблення сигналу.** Другий напрямок стеганографії для мультимедійних даних, що активно розвивається, вивчає цифрову обробку сигналу. Сигнал – це зміна будь-якої фізичної величини, яка використовується для пересилання даних. Якщо він є безперервним у часі, це аналоговий сигнал. Можна відобразити аналоговий сигнал на графіку, де на горизонтальній осі буде відраховуватись час, а на вертикальній рівні сигналу. Поділ горизонтальної осі на рівні одиниці часу називається дискретизацією. Надання кожному такому відліку значення рівня сигналу називається квантуванням. Якщо ми застосуємо до аналогового сигналу дискретизацію та квантування, ми отримаємо цифровий сигнал [22]. Цифровий сигнал – це сигнал, який можна представити у вигляді дискретних (цифрових) значень. Приклад відображення цифрового сигналу показано на рис. 4. Надмірність аудіовізуальних даних дозволяє «сховати» секретну інформацію [18] усередині контейнера з аудіовізуальними даними. Крім того, особливість аудіо та відео файлів полягає в тому, що їх можна почути або побачити відповідно, а людське вухо та око мають дуже обмежені можливості в частині сприйняття звукових або колірних відтінків. Це дозволяє «заховати» приховану інформацію у невеликих спотвореннях сигналу, непомітних для людського ока чи вуха.

До прихованої, всередині звукового або відео контейнера, інформації (стеганоповідомлення, у нашому випадку це ЦВЗ) пред'являється ряд вимог: надійність сприйняття, стійкість до руйнівних атак, стійкість до стеганоаналізу, а також невелика обчислювальна складність в умовах використання в режимі реального часу [20].

Звертаємо увагу ще й на те, що присутність ЦВЗ у файлі повинна зберігатися і при зміні тривалості самого файлу, щоб при поділі нашого ЦВЗ не залишився у відрізаний частині.

Цифрова обробка сигналу – це способи обробки сигналу на основі чисельних методів з використанням цифрових обчислювальних засобів. В основі лежить дискретне перетворення Фур'є, яке дозволяє аналоговий сигнал зазнати дискретизації та квантування.

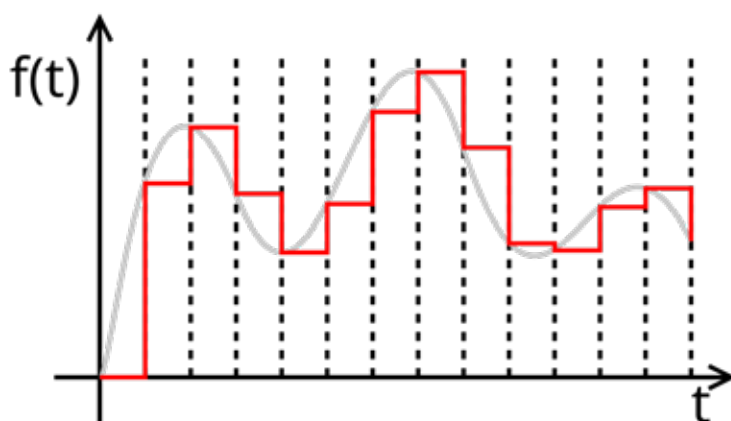


Рис. 4. Цифровий сигнал

Це дозволяє розглядати будь-який цифровий сигнал як деяку матрицю (приклад на рис. 5), а до неї, відповідно, застосовні всі математичні методи для матриць.

Для цифрового звукового файлу тут рядки – це тимчасові відліки (зазначені у дужках,  $0 < t < T$ ), а  $S_i(t)$  у стовпці визначають рівень сигналу різної частоти. Такою матрицею можна описати і відео, стовпці описуватимуть колірні та світлові характеристики для кожної точки зображення.

$$S_{(TxM)} = \begin{pmatrix} s_1(1) & s_2(1) & \dots & s_i(1) & \dots & s_M(1) \\ s_1(2) & s_2(2) & \dots & s_i(2) & \dots & s_M(2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_1(t) & s_2(t) & \dots & s_i(t) & \dots & s_M(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_1(T) & s_2(T) & \dots & s_i(T) & \dots & s_M(T) \end{pmatrix}$$

Рис. 5. Цифровий сигнал у вигляді матриці [23]

Найбільш популярними методами стеганографії, які використовуються для цифрових сигналів, що представляють собою цифрове аудіо або відео, є методи засновані на незначних спотвореннях цифрового сигналу, таких як реверберація, частотно-фазова модуляція [24, 25].

**Метод, що ґрунтується на явищі реверберації.** Розглянемо, як працює метод реверберації. Метод ґрунтується на властивості людського слуху не розрізняти присутність ехосигналу, якщо затримка між основним сигналом та ехосигналом не перевищує певного часу.

Реверберація є результатом багатьох відображень звуку, які виникають у реальному приміщенні. Насправді ми чуємо реверберацію щодня і настільки звикли чути реверберацію без будь-якого особливого відчуття.

Реверберація, ймовірно, є одним із найбільш часто використовуваних ефектів у музиці. Було розроблено різноманітні способи синтетичного додавання реверберації до записів. Практично додавання реверберації означає взяти лінійну згортку імпульсної характеристики приміщення (IR, impulse response) і джерела звуку.

Існують різні схеми розрахунку імпульсної характеристики приміщення, яке визначається формою, розміром і коефіцієнтом матеріалів його поверхні, а також положенням джерела та слухача в приміщенні. Це одновимірна дискретна функція часу, яку можна описати рівнянням:

$$h(n) = a_1 * \delta(n - n_1) + a_2 * \delta(n - n_2) + \dots + a_L * \delta(n - n_L) \quad (3)$$

де  $L$  – довжина імпульсної характеристики приміщення  $h(n)$ ,  $a_i$  – величина  $i$ -го відбитого звуку,  $n_i$  – час затримки  $i$ -го відбитого звуку. Це дозволить нам використовувати його як IR – імпульсну характеристику для імітації реверберації. Експерименти демонструють, що імпульсні характеристики  $h(t)$  явно відрізняються в однакових параметрах кімнати, але положення джерела та слухача різне. Ми просто використовуємо різницю, щоб вставити ЦВЗ. Прихована інформація кодується в параметрах реверберації, таких як час затримки, коефіцієнт загасання, частотні характеристики або амплітуда відлуння. Наприклад, невеликі зміни часу затримки реверберації можуть бути бітами даних.

Цей метод вразливий до навмисних атак, спрямованих на придушення луни. Алгоритми для придушення луни відносно прості в реалізації та доступні. Зловмисники можуть легко застосувати такі алгоритми до підозрілого аудіофайлу, щоб нейтралізувати можливе приховане повідомлення, навіть якщо вони не знають, чи використовується реверберація для стеганографії. Це робить метод уразливим перед навіть нецільовими атаками на аудіофайл.

Використання явища реверберації створення системи цифрових водяних знаків також часто розглядається у науковій літературі [24]. Розглянемо застосування ефекту реверберації для розміщення ЦВЗ всередині звукового файлу з використанням одного кімнатного імпульсу, незначно модулюючи час затримки між основним сигналом і часом початку реверберації. В цьому випадку схема занурення виглядає так, як показано на рис. 6.

На рисунку 6  $v(1) - v(M)$  – імпульсні відгуки фільтрів, що застосовуються для імітації реверберації. Відмінність між фільтрами  $v(1) - v(M)$  полягає у різному часі затримки між вихідним сигналом та реверберацією. Так як можливе використання кількох величин затримки, то проміжок часу, протягом якого діє один фільтр, можна вкласти  $M$  біт, де  $M$  – число використовуваних варіантів затримки.

Якщо позначити вихідний сигнал  $S(t)$  і перейти до безперервного часу  $t$ , з'являється можливість апроксимувати гауссівським процесом з відомою кореляційною функцією, яка описує залежність між значеннями процесу в різних точках часу або простору. Можна припустити, що це дозволяє побудувати оптимальний приймач для виділення одного біта вкладеної інформації (при використанні двох фільтрів). Схема оптимального прийому сигналів Гауса відображена на рис. 7.

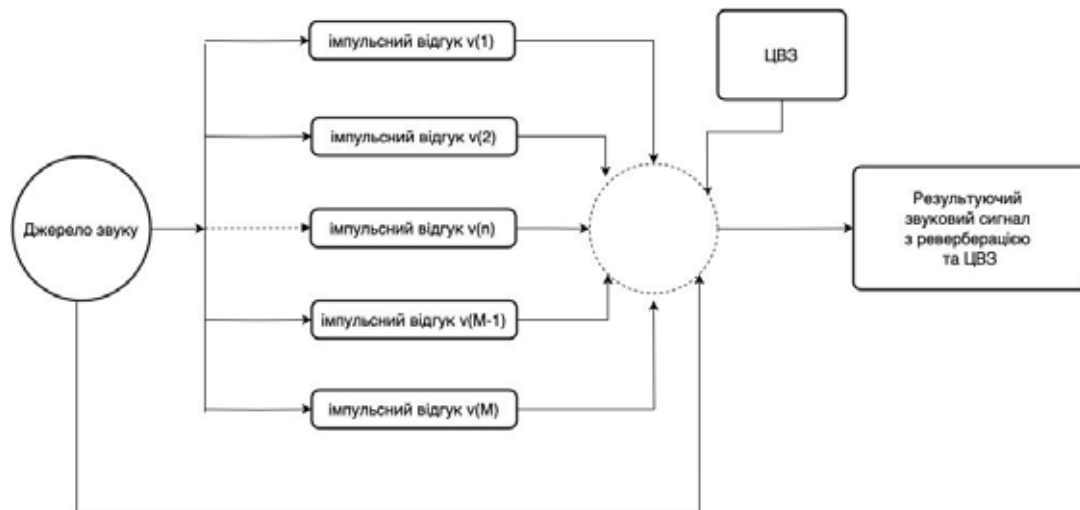


Рис. 6. Метод додавання ЦВЗ, заснований на реверберації

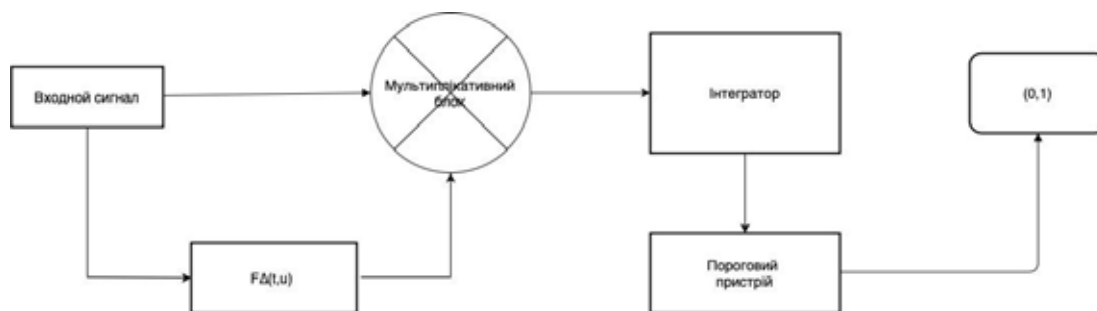


Рис. 7. Оптимальний прийом сигналів Гауса

На рисунку 7  $F_{\Delta}(t,u)$  – розв’язання інтегрального рівняння:

$$\int_0^T \int_0^T P_0(t,x) F_{\Delta}(x,y) P_1(y,u) dx dy = P_1(t,u) - P_0(t,u) \tag{4}$$

де  $P_{0(u)}(t,x)$  – кореляційні функції сигналів на виході першого та другого фільтра відповідно;  $T$  – часовий інтервал, у якому вбудовується один біт.

Однак, модель з гауссівською апроксимацією вхідного сигналу  $S(t)$ , яка призводить до оптимальної вирішальної схеми, показаної на рис. 7, суттєво відрізняється від нашої вихідної моделі тим, що звуковий сигнал досить погано апроксимується гауссівським процесом. Також точно не відома кореляційна функція вхідного звукового сигналу, та не можна вважати взаємозалежними сигнали на входах першого та другого фільтрів. Все це вказує на те, що ми не зможемо побудувати оптимальний приймач для отримання одного біта вкладеної інформації, спираючись на викладену на рис. 7 схему при доказі її оптимальності.

### Висновки

Проблема вбудовування ЦВЗ в аудіовізуальній продукції поки що не має чіткого рішення, яке б задовольняло всі необхідні умови, які повинні виконуватися. Методи запропоновані різними вченими досить ефективні за певних умов і в конкретній ситуації. Однак жоден з них не є достатньо універсальним, щоб він міг бути застосовним для будь-якого типу аудіовізуальних даних.

Найбільш перспективними здаються стеганографічні методи, які стосуються змін безпосередньо самого звуку або зображення, в даному випадку більш актуальним є питання стійкості таких методів до навмисних атак або стегоаналізу. Але не можна скидати з рахунків методи, пов’язані з файловими змінами. Сучасні технології та пристрої все більше видаляють користувача від того, що лежить в основі споживаної ними інформаційної продукції, обмежуючи його можливості щодо втручання в сам інформаційний продукт.

Аналіз опублікованих робіт щодо цифрової стеганографії показує величезний інтерес, який викликає ця тема у дослідників. Захист авторського права на аудіовізуальний контент має не лише юридичні та технічні аспекти. Якщо взяти до уваги, що йдеться про величезний потік цифрового контенту, який щодня з’являється на просторах інтернет і фактично є частиною нашого життя, стає зрозуміло, що актуальність проблеми з кожним днем збільшується.

## Список використаної літератури

1. Про обов'язковий примірник документів: Закон України від 09.04.1999 № 595-XIV. Відомості Верховної Ради України, 1999, № 22-23, Ст. 199.
2. Цивільний кодекс України від 16.01.2003 № 435-IV. Відомості Верховної Ради України, 2003, № 40-44, Ст. 356.
3. Конституція України від 28.06.1996 № 254к/96-ВР. Відомості Верховної Ради України, 1996, № 30, Ст. 141.
4. Про авторське право і суміжні права: Закон України від 15.04.2023, підстава – 2974-IX URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2811-20#Text> (дата звернення: 18.06.2024).
5. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Створення об'єктів інтелектуальної власності: Навчальний посібник. Ужгород: Видавництво УжНУ «Говерла», 2020. 407 с. URL: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/45071> (дата звернення: 18.06.2024).
6. Про державну реєстрацію прав автора на твори науки, літератури і мистецтва: Постанова Кабінету міністрів України від 18.07.1995 № 532 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/532-95-%D0%BF#Text> (дата звернення: 18.06.2024).
7. Про медіа: Закон України від 13.12.2022 № 2849-IX. Відомості Верховної Ради України, 2023, № 47-50, Ст.120.
8. Liu C. et al. Dear: A deep-learning-based audio re-recording resilient watermarking. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2023. Vol. 37. Is. 11. P. 13201-13209.
9. Світловський Є. В. Моделі і алгоритми створення цифрових водяних знаків для аудіо-файлів. Перспективні технології та прилади. 2024. Т. 1. №. 24. С. 99-106.
10. Voloshynovskiy S. et al. Attacks on digital watermarks: classification, estimation based attacks, and benchmarks. IEEE communications Magazine. 2001. Т. 39. №. 8. P. 118-126.
11. Popa R. An analysis of steganographic techniques. The Politehnica University of Timisoara, Faculty of Automatics and Computers, Department of Computer Science and Software Engineering. 1998. Vol. 65. 59 pp.
12. Johnson N. F. et al. Information Hiding: Steganography and Watermarking-Attacks and Countermeasures, Journal of Electronic Imaging. 2001, 10. 825. 10.1117/1.1388610.
13. Boroughf V. The next great YouTube: improving content ID to Foster creativity, cooperation, and fair compensation. Alb. LJ Sci. & Tech. 2015. Vol. 25. P. 95.
14. Як працює система Content ID. Довідка Youtube <https://support.google.com/youtube/answer/2797370?hl=uk>
15. Yatigamma K., Wijayarathna G. Integrating Micro-lesson Metadata in ID3V2 of MP3. 2021 From Innovation To Impact (FITI). IEEE, 2021. Vol. 1. P. 1-6.
16. Nilsson M., „ID3 tag version 2.4.0 – Main Structure,“ 01 November 2000. [Online]. Available: <https://id3.org/id3v2.4.0-structure>. [Accessed 07 December 2020].
17. Samborskiy I., Tolstova A. Сучасний стан та перспективи розвитку стеганографії у телекомунікаційних системах. Collection” Information Technology and Security”. 2022. Т. 10. №. 1. С. 27-38.
18. Іванов В. Г. та ін. Захист авторських прав мультимедійних даних. Theory and practice of jurisprudence. 2011. Т. 1. №. 1. С. 18-18.
19. Олещенко Л. М. Програмне забезпечення для аналізу даних платформи YouTube. Вчені записки. 2024. С. 22024111.
20. Світловський Є., Трапезон К. Стеганографічні підходи до оброблення аудіосигналів. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. 2023. Вип. 3. С. 185-192.
21. Лавер В. О., Левчук О. М. Обробка зображень: навч.-метод. посіб. 2021. С. 11.
22. Lin Y. et al. Audio watermark. Audio Watermark A Comprehensive Foundation Using MATLAB. Springer International Publishing; Cham, Switzerland, 2015. 213 pp.
23. Ngo N. M., Unoki M. Method of audio watermarking based on adaptive phase modulation. IEICE transactions on information and systems. 2016. Vol. 99. №. 1. P. 92-101.
24. Hua G. et al. Twenty years of digital audio watermarking—a comprehensive review. Signal processing. 2016. Vol. 128. P. 222-242.
25. Nian G., Wang S., Ge Y. Research of improved echo data hiding: audio watermarking based on reverberation. 2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing-ICASSP'07. IEEE, 2007. Vol. 2. P. II-177-II-180.

## References

1. Pro oboviazkovyi prymirnyk dokumentiv: Zakon Ukrainy vid 09.04.1999 № 595-XIV [Law of Ukraine on the Mandatory Copy of Documents, No. 595-XIV] (1999). *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy – The Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine*, (22-23), 199 [in Ukrainian].

2. Tsyvilnyi kodeks Ukrainy vid 16.01.2003 № 435-IV [The Civil Code of Ukraine, No. 435-IV] (2003). *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy – The Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine*, (40-44), Art. 356 [in Ukrainian].
3. Konstytutsiia Ukrainy vid 28.06.1996 № 254к/96-VR [The Constitution of Ukraine, No. 254к/96-BP] (1996). *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy – Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrayiny*, (30), 141 [in Ukrainian].
4. Pro avtorske pravo i sumizhni prava: Zakon Ukrainy vid 15.04.2023, pidstava – 2974-IX [Law of Ukraine on Copyright and Related Rights, No. 2974-IX] (2023). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2811-20#Text> [in Ukrainian].
5. Suslikov, L. M., & Studeniak, I. P. (2020). Stvorennia ob'ektiv intelektualnoi vlasnosti: Navchalnyi posibnyk [Creation of Intellectual Property Objects: Study guide]. *Uzhhorod: Vydavnytstvo UzhNU «Hoverla» – Uzhhorod: UzhNU Publishing House 'Hoverla'*. Retrieved from <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/4507> [in Ukrainian].
6. Pro derzhavnu reiestratsiiu prav avtora na tvory nauky, literatury i mystetstva: Postanova Kabinetu ministriv Ukrainy vid 18.07.1995 № 532 [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine on State Registration of Author's Rights to Works of Science, Literature, and Art, No. 532] (1995). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/532-95-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].
7. Pro media: Zakon Ukrainy vid 13.12.2022 № 2849-IX [Law of Ukraine on Media, No. 2849-IX] (2022). *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy – Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine*, (47-50), 120 [in Ukrainian].
8. Liu, C., et al. (2023). Dear: A deep-learning-based audio re-recording resilient watermarking. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 37 (11), 13201-13209 [in English].
9. Svitlovskiy Ye. V. (2024). Modeli i alhorytmy stvorennia tsyfrovyykh vodianykh znakov dlia audio-failiv [Models and algorithms for creating digital watermarks for audio files]. *Perspektyvni tekhnologii ta prylady – Perspective technologies and devices*, 1 (24), 99-106 [in Ukrainian].
10. Voloshynovskiy, S., et al. (2001). Attacks on digital watermarks: Classification, estimation-based attacks, and benchmarks. *IEEE Communications Magazine*, 39(8), 118-126 [in English].
11. Popa, R. (1998). An analysis of steganographic techniques. The Politehnica University of Timisoara, Faculty of Automatics and Computers, Department of Computer Science and Software Engineering, 65 [in English].
12. Johnson, Neil & Duric, Zoran & Jajodia, Sushil & Memon, Nasir. (2001). Information Hiding: Steganography and Watermarking—Attacks and Countermeasures. *Journal of Electronic Imaging*, 10, 825. 10.1117/1.1388610 [in English].
13. Boroughf, B. (2015). The next great YouTube: Improving content ID to foster creativity, cooperation, and fair compensation. *Albany Law Journal of Science & Technology*, 25, 95 [in English].
14. Yak pratsiuiie systema Content ID. Dovidka Youtube [YouTube Help. How the Content ID system works]. Retrieved from <https://support.google.com/youtube/answer/2797370?hl=uk> [in Ukrainian].
15. Yatilgammana, K., & Wijayarathna, G. (2021). Integrating micro-lesson metadata in ID3V2 of MP3. From Innovation to Impact (FITI). *IEEE*, 1, 1-6 [in English].
16. Nilsson, M. (2000). ID3 tag version 2.4.0 – Main structure. Retrieved from <https://id3.org/id3v2.4.0-structure> [in English].
17. Samborskiy, I., & Tolstova, A. (2022). Suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku stehanohrafiy u telekomunikatsiinykh systemakh [Current state and prospects of steganography development in telecommunication systems]. Collection» Information Technology and Security»- *Collection 'Information Technology and Security*, 10 (1), 27-38 [in Ukrainian].
18. Ivanov, V. G., et al. (2011). Zakhyst avtorskykh prav multymediinykh danykh [Copyright protection of multimedia data]. *Theory and practice of jurisprudence – Theory and Practice of Jurisprudence*, 1 (1), 18-18 [in Ukrainian].
19. Oleshchenko, L. M. (2024). Prohramne zabezpechennia dlia analizu danykh platformy YouTube [Software for analyzing YouTube platform data]. *Vcheni zapysky – Scientific Notes*, 22024111 [in Ukrainian].
20. Svitlovsky E., Trapezon K. (2023). Stehanohrafichni pidkhody do obroblyennia audiosyhnaliv [Steganographic approaches to audio signal processing]. (2023). *Visnyk KrNU imeni Mykhayla Ostrohradskoho – Bulletin of the Mykhailo Ostrohradskiy Kyiv National University*, Issue 3, 185-192 [in Ukrainian].
21. Laver, V. O., & Levchuk, O. M. (2021). Obrobka zobrazen: navch.-metod. posib [Image processing: Study guide]. 11. [in Ukrainian].
22. Lin, Y., et al. (2015). Audio Watermark: A Comprehensive Foundation Using MATLAB. Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 213 [in English].
23. Ngo, N. M., & Unoki, M. (2016). Method of audio watermarking based on adaptive phase modulation. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 99 (1), 92-101 [in English].
24. Hua, G., et al. (2016). Twenty years of digital audio watermarking—a comprehensive review. *Signal Processing*, 128, 222-242 [in English].
25. Nian, G., Wang, S., & Ge, Y. (2007). Research of improved echo data hiding: Audio watermarking based on reverberation. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing-ICASSP'07*, 2, II-177-II-180 [in English].

**В. М. ПАХОМОВА**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри електронних обчислювальних машин  
Український державний університет науки і технологій  
ORCID: 0000-0002-0022-099X

**О. В. ГАЛУШКА**

аспірант  
Український державний університет науки і технологій  
ORCID: 0009-0005-3447-2676

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОРІВНЕВОГО ВИЯВЛЕННЯ PROBE АТАК ЗАСОБАМИ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

У даній роботі проведено дослідження дворівневого виявлення мережесих атак категорії Probe засобами нейронних мереж.

Запропоновано використання багатошарового перцептронну конфігурації 31-1-124-5, де 31 – кількість вхідних нейронів; 1 – кількість прихованих шарів; 124 – кількість прихованих нейронів; 5 – кількість результуючих нейронів для виявлення мережесих категорії атаки DoS, U2R, R2L та Probe (на першому рівні) та самоорганізуючої карти Кохонена 10\*10 для виявлення мережесих класів атак відповідно до категорії Probe: Ipsweep; Nmap; Portsweep; Satan (на другому рівні). Для виявлення мережесих атак категорії Probe створено з використанням мови Python та бібліотеки PyTorch програмну модель «MLP1-SOM2\_Probe», що заснована на реалізації запропонованих конфігурацій багатошарового перцептронну та самоорганізуючої карти Кохонена. Для організації досліджень використані дані із KDDCup99, що пройшли відповідну обробку на підготовчому етапі: очищення даних; вибір ознак; мапінг категоріальних ознак; масштабування та нормалізація; розбиття даних на відповідні вибірки (навчальна, тесту вальна та валідаційна). На створеній моделі «MLP1-SOM2\_Probe» визначені оптимальні параметри відповідних нейронних мереж: функція активації, оптимізатор і швидкість навчання для MLP1; ступінь впливу нейрона на сусідні нейрони та швидкість навчання для SOM2. Проведено оцінювання параметрів якості дворівневого виявлення Probe атак на створеній моделі «MLP1-SOM2\_Probe». Визначено, що дворівневе виявлення атак на моделі «MLP1-SOM2\_Probe» склало в середньому приблизно 98,8 %, що дозволяє досягти більш високої точності в зрівнянні з дворівневим виявленням атак на основі використання моделі «MLP1-MLP2\_Probe».

**Ключові слова:** атака, Probe, дворівневе виявлення, категорія, клас, багатошаровий перцептрон, самоорганізуюча карта, вибірка, точність.

**V. M. PAKHOMOVA**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Electronic Computers  
Ukrainian State University of Science and Technology  
ORCID: 0000-0002-0022-099X

**O. V. HALUSHKA**

Postgraduate Student  
Ukrainian State University of Science and Technology  
ORCID: 0009-0005-3447-2676

## TWO-LEVEL DETECTION OF PROBE ATTACKS BY MEANS OF NEURAL NETWORKS

In this paper, a study of two-level detection is carried out network attacks of the Probe category by means of neural networks.

The use of a multilayer perceptron is proposed configurations 31-1-124-5, where 31 is the number of input neurons; 1 – quantity hidden layers; 124 – the number of hidden neurons; 5 – quantity resulting neurons to detect the network attack category DoS, U2R, R2L and Probe (on the first level) and a self-organizing Kohonen map 10\*10 to detect network attack classes according to the Probe category: Ipsweep; Nmap; Portsweep; Satan (on the second level). To detect network attacks categories Probe created using the Python language and the PyTorch «MLP1-SOM2\_Probe» software model based on the implementation of proposed multilayer perceptron configurations and of the self-organizing map of Kohonen. For the organization of research, data from KDDCup99 that has been properly processed at the preparatory stage: data cleansing; selection of features; mapping of categorical features; scaling and normalization; splitting the

data into appropriate samples (training, testing and validation). On the created model «MLP1-SOM2\_Probe» defined optimal parameters of the corresponding neural networks: activation function, optimizer and learning speed for MLP1; the degree of influence of the neuron on nearby neurons and learning rate for SOM2. Evaluation conducted quality parameters of two-level detection of Probe attacks on the created model «MLP1-SOM2\_Probe». It is determined that two-level detection of attacks on models «MLP1-SOM2\_Probe» averaged about 98.8%, which allows achieve higher accuracy compared to two-level attack detection based on the use of the «MLP1-MLP2\_Probe» model.

**Key words:** attack, Probe, two-level detection, category, class, multilayer perceptron, self-organizing map, sampling, accuracy.

### Постановка проблеми

Наявність і постійний ріст загроз мережевих атак у режимі реального часу створюють необхідність розробки ефективної системи виявлення таких атак. Існуючі методи не завжди здатні виявити нові, раніше невідомі атаки, що створює ризик для безпеки комп'ютерних мереж. Перспективним напрямком у створенні систем виявлення мережевих атак, які повинні ґрунтуватися на адаптивних алгоритмах здатних до самонавчання, є застосування нейронних мереж, а іноді навіть комплексу нейронних мереж.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сучасному етапі для виявлення мережевих атак найчастіше використовуються нейронні мережі (НМ): багатошаровий перцептрон (Multi Layer Perceptron, MLP); радіально-базисна мережа (Radial Basis Function Network, RBF), самоорганізуюча карта Кохонена (Self Organizing Map, SOM), а також нейронечітка мережа (Adaptive Network Based Fuzzy Inference System, ANFIS). Ефективність машинного навчання НМ залежить від правильно підготовлених даних, що потребує виконання відповідного аналізу бази даних (KDDCup99, NSL-KDD та UNSW-NB15). Відомо, що різні НМ можуть неоднаково виявляти різноманітні мережеві атаки таких категорій як: DoS, U2R, R2L та Probe. З одного боку, для виявлення мережевих атак категорії Probe авторами були використані ANFIS [1], SOM [2], MLP [3]. З іншого боку, авторами досліджувалась можливість дворівневого виявлення мережевих атак на комплексі нейронних мереж [4], де на першому рівні виявляється мережева категорія, а на другому рівні виявляється мережевий клас відповідно до визначеної категорії, але разом з тим важливим недоліком таких методик є відсутність універсальності їх застосування.

### Формулювання мети дослідження

Проведені дослідження ставили за мету подальший розвиток методики дворівневого виявлення мережевих атак категорії Probe. Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі: виявлення мережевих категорій атак засобами багатошарового перцептрон на першому рівні; виявлення мережевих класів атак відповідно до категорії засобами самоорганізуючої карти Кохонена на другому рівні; при виконанні машинного навчання визначення оптимальних параметрів відповідних нейронних мереж, що забезпечить достатньо високий рівень достовірності виявлення вторгнень в комп'ютерну мережу; оцінювання параметрів якості виявлення мережевих атак категорії Probe на створеній програмній моделі.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Категорія Probe мережевих атак полягає у скануванні портів з метою отримання конфіденційної інформації. До категорії Probe надходять наступні мережеві класи атак [5]: Ipsweeper – сканування IP-адрес в мережі для виявлення активних хостів; Nmap – для сканування портів та виявлення відкритих сервісів; Portsweeper – сканування портів на одному або декількох хостах для виявлення відкритих сервісів; Satan – для автоматичного сканування мережі та виявлення вразливостей.

**Аналіз бази KDDCup99 та підготовка даних.** Ефективність машинного навчання НМ залежить від правильно підготовлених даних та включає наступні етапи: 1) очищення даних (видалення дублікатів, заповнення пропущених значень за допомогою середніх значень або за іншими методами); 2) вибір ознак (позбутися неінформативних та сильно корелюючих ознак, що в свою чергу допоможе спростити нейронну модель); 3) мапінг категоріальних ознак (всі категоріальні ознаки повинні бути трансформовані в числа в той чи інший спосіб) [6]; 4) масштабування та нормалізація (всі ознаки приведені до інтервалу [0; 1] з використанням MinMaxScaler [7] та Scikit-Learn [8]); крім того, забезпечено баланс між наявними прикладами для кожного з мережевих класів); 5) формування вибірок (навчальної тесту вальної та валідаційної), при цьому важливо підібрати правильне співвідношення розміру між ними. Таким чином, з початкового набору в 41 ознаку (параметри мережевого трафіку) [5] видалено 2 ознаки за однаковими значеннями для всіх записів та 8 сильно корелюючих ознак; у результаті маємо вхідні вектори з 31 ознакою.

**Багатошаровий перцептрон та визначення оптимальних параметрів.** Відповідно до теореми Арнольда-Колмогорова та Хехт-Нільсена кількість прихованих нейронів склала  $124 \leq K_{np} \leq 691$ ; для дослідження взято MLP1 конфігурації 31-1-124-5 (рис. 1), де 31 – кількість вхідних нейронів (параметри мережевого трафіку [5]); 1 – прихований шар; 124 – кількість прихованих нейронів; 5 – кількість результуючих нейронів, що на першому рівні визначають нормальний стан (відсутність атаки, Normal) або наявність мережевої атаки категорії DoS, Probe, R2L, U2R.



Відповідні вибірки вміщують в собі дані, що представлені всіма наявними категоріями атак та типами атак. Розмірність вхідного вектору – 31, розмірність вихідного вектору – 5, кількість векторів в патчі – 64, кількість навчальних записів – 8099, кількість записів для тестування – 4049, кількість записів для валідації – 1351.

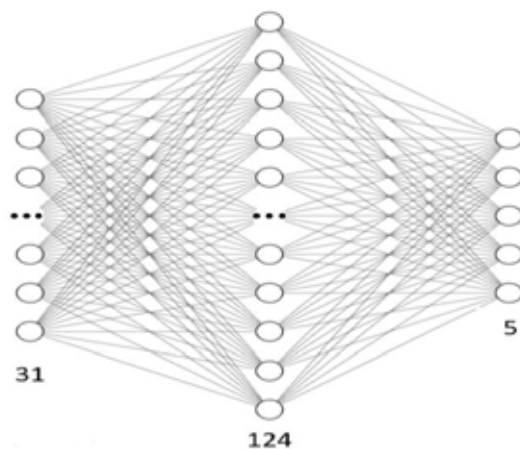


Рис. 1. MLP1 конфігурації 31-1-124-5

Для програмної реалізації НМ прийнято рішення щодо використання мови Python та бібліотеки PyTorch з широким інструментарієм по їх створенню та дослідженню. Загальна структура створеної програмної моделі «MLP1-SOM2\_Probe» представлена на рис. 2.

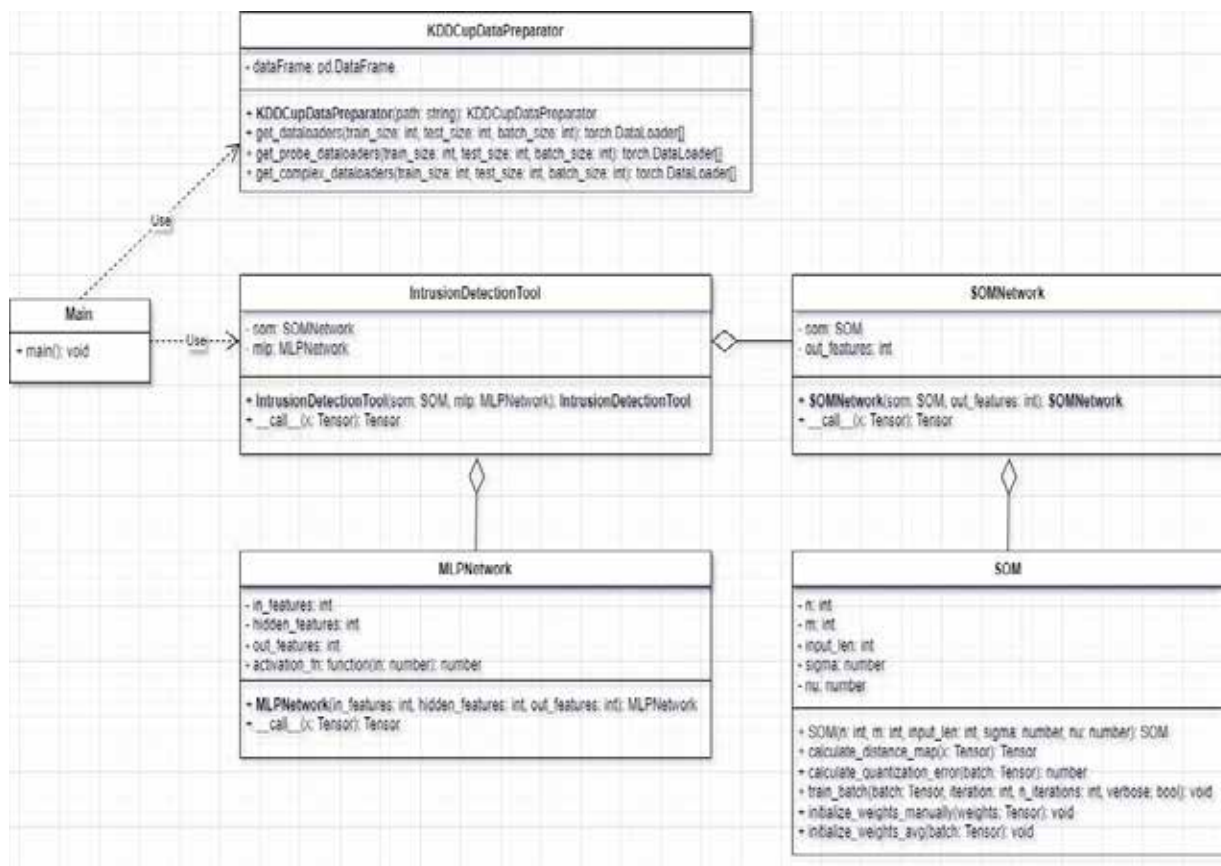


Рис. 2. Структура створеної програмної моделі «MLP1-SOM2\_Probe»

Для MLP1 конфігурації 31-1-124-5 на створеній програмній моделі проведені дослідження Loss: за різними функціями активації та оптимізаторами навчання (рис. 3).

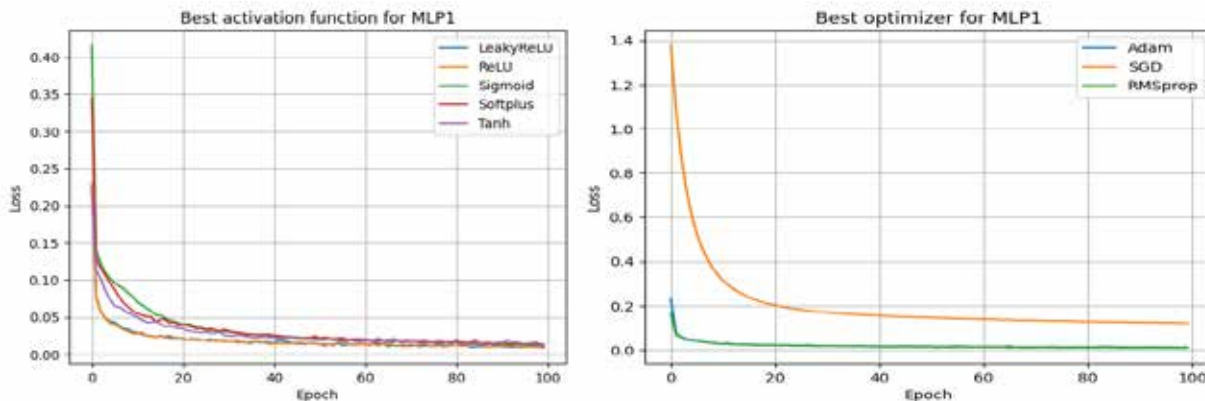


Рис. 3. Дослідження MLP1 конфігурації 31-1-124-5

Результати дослідження MLP1 конфігурації 31-1-124-5 при визначених оптимальних параметрах (функція активації – LeakyReLU; оптимізатор – Adam; швидкість навчання – 0,01) зведені до табл. 1.

Таблиця 1

Результати дослідження MLP1 конфігурації 31-1-124-5

Normal	DoS	Probe	R2L	U2R
0,99	1,00	0,99	0,98	0,53

Самоорганізуюча карта Кохонена та визначення оптимальних параметрів. На другому рівні виявляємо мережвий клас атаки (ipsweep, nmap, portsweep, satan) відповідно до категорії Probe з використанням SOM2(10\*10), що представлений на рис. 4.

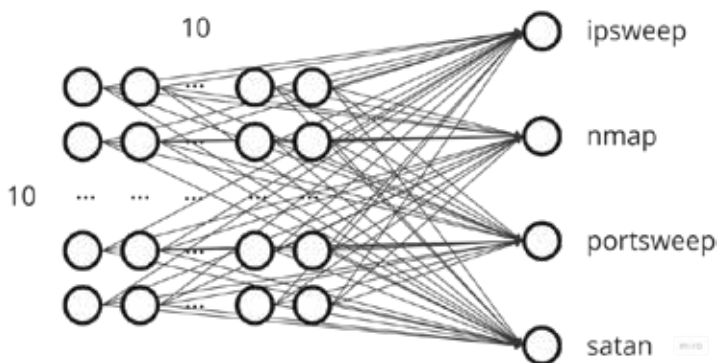


Рис. 4. Архітектура SOM2(10\*10) для виявлення Probe атак

Процес навчання SOM2(10\*10) починається з обчислення кращого нейрона на карті на основі мінімального значення дистанції між вхідним вектором та ваговим вектором кожного нейрона (під дистанцією розуміється Евклідова відстань) [9]:

$$d_j(x) = \sum_{i=1}^D (x_i - w_{ij})^2, \tag{1}$$

де  $D$  – розмірність вхідного вектору;  $x_i$  –  $i$ -й компонент вхідного вектора ( $i = 1, \dots, D$ );  $w_{ij}$  –  $i$ -й компонент вагового вектора  $j$ -го нейрона ( $j = 1, \dots, N$ ),  $N$  – загальна кількість нейронів.

Після вибору кращого нейрона обчислюється вплив цього нейрона на нейрони, що знаходяться поруч з ним, за наступною формулою:

$$T_{i,I(x)} = \exp\left(\frac{-S_{j,I(x)}^2}{2\sigma^2}\right), \tag{2}$$

де  $I(x)$  – індекс нейрона-переможця;  $S_{j,I(x)}$  – відстань на карті до кращого нейрона;  $\sigma$  – кількість сусідів.

Далі формується матриця зміни вагових векторів, яка потім додається до матриці ваг всіх нейронів, що змінює вектори ваг для всіх нейронів. Кожен компонент обчислюється за формулою:

$$\Delta w_{ij} = \eta(t) T_{j,I(x)}(t), \tag{3}$$

де  $t$  – кількість епох;  $\eta$  – гіперпараметр, що визначає швидкість навчання.

Для оцінювання якості кластеризації даних самоорганізуючою картою використана похибка квантизації (метрика, що показує наскільки добре розтягнута нейронна решітка на множині навчальних прикладів), що розраховується за формулою на основі ВМУ (Best Matching Unit) [10]:

$$Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i - w_{BM(i)}, \tag{4}$$

де  $N$  – кількість вхідних векторів даних для розрахунку похибки;  $x_i$  –  $i$ -й вхідний вектор;  $w_{BM(i)}$  – ваговий вектор найближчого нейрона до  $x_i$ .

Вибірки для SOM2(10\*10) вміщують в собі дані, що відносяться до категорії Probe. Розмірність вхідного вектору – 31, розмірність вихідного вектору – 4, кількість векторів в патчі – 64, кількість навчальних записів – 2464, кількість записів для тестування – 1232, кількість записів для валідації – 411. Результати дослідження, що отримані на SOM2(10\*10), зведено до табл. 2.

Таблиця 2

Помилка квантизації SOM2(10\*10)

$\sigma$	$\eta = 10^{-1}$	$\eta = 10^{-2}$	$\eta = 10^{-3}$
1	0,0993	0,1664	0,2256
3	0,1340	0,1367	0,1789
5	0,1275	0,1513	0,1744
7	0,1445	0,1479	0,1758
9	0,1711	0,1752	0,1584

Для дослідження обрано SOM2(10\*10) з параметрами  $\sigma = 5; \eta = 10^{-1}$ . Візуалізацію карт активацій показано на рис. 5.

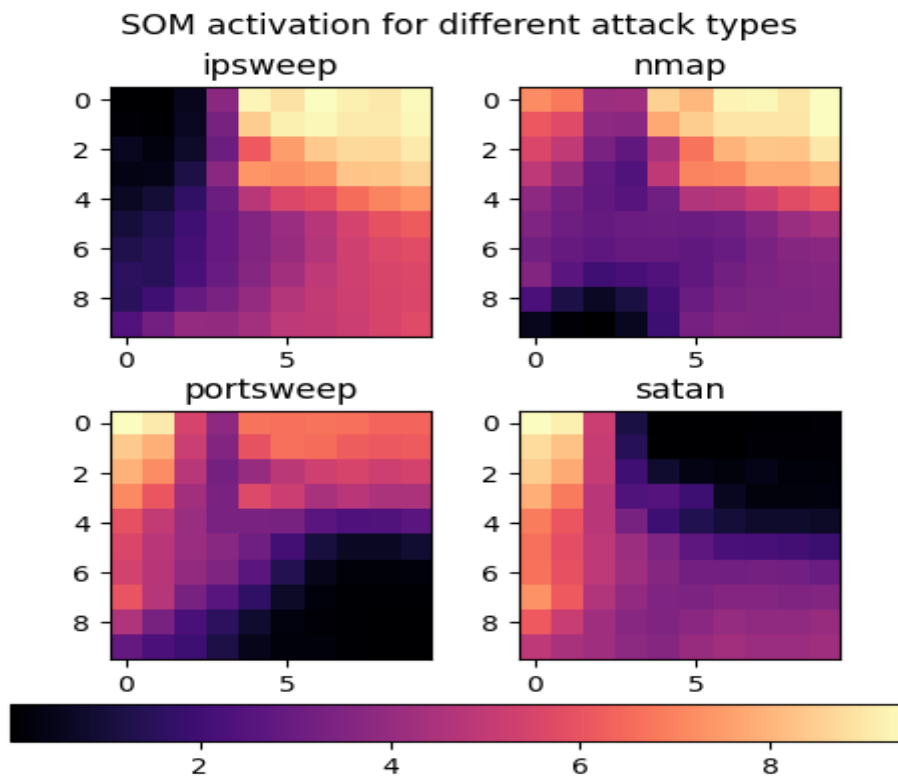


Рис. 5. Візуалізація карт активацій SOM2 (10\*10)

**Оцінка якості виявлення Probe атак на моделі «MLP1-SOM2\_Probe».** Отримані результати щодо виявлення Probe атак на моделі «MLP1-SOM2\_Probe» зведені до табл. 3, де  $N$  – кількість вхідних векторів,  $N_{кор}$  – кількість правильно класифікованих векторів,  $\varepsilon$  – загальна точність моделі,  $N_{\alpha}$  – кількість помилок першого роду,  $\alpha$  – доля помилок першого роду,  $N_{\beta}$  – кількість помилок другого роду,  $\beta$  – доля помилок другого роду.

Таблиця 3

Параметри якості виявлення Probe атак на моделі «MLP1-SOM2\_Probe»

Запуски	N	$N_{кор}$	$\varepsilon$	$N_{\alpha}$	$\alpha$	$N_{\beta}$	$\beta$
1	4049	4012	0,99086	18	0,00444	7	0,00172
2	4049	3990	0,98542	26	0,00642	10	0,00246
3	4049	4007	0,98962	14	0,00345	10	0,00246
4	4049	3993	0,98616	28	0,00691	8	0,00197
5	4049	4006	0,98938	23	0,00568	8	0,00197

Із таблиці видно, що дворівневе виявлення Probe атак дозволяє досягти більш високої точності моделі «MLP1-SOM2\_Probe», та склало в середньому приблизно 98,80 % (в зрівнянні з 97,35 %, що отримано в [4], при використанні «MLP1-MLP2\_Probe»); при цьому помилки першого та другого роду склали в середньому приблизно 0,54 % та 0,21 % відповідно.

### Висновки

Для виявлення Probe атак запропоновано дворівневе виявлення атак, що дозволяє виявляти мережеву категорію засобами MLP1 конфігурації 31-1-124-5 (на першому рівні) та мережевий клас атаки засобами SOM2(10\*10) відповідно до категорії (на другому рівні). Для досліджень використані дані із KDDCup99, що пройшли відповідну обробку. З використанням Python та PyTorch створено модель «MLP1-SOM2\_Probe», на основі якої визначені оптимальні параметри MLP1 (на першому рівні) і SOM2 (на другому рівні). Проведено оцінювання параметрів якості виявлення Probe атак на створеній програмній моделі «MLP1-SOM2\_Probe».

### Список використаної літератури

- Пахомова В. М., Маслак А. В. Визначення атак категорії Probe з використанням бази даних KDDCup99 та нейронечіткої технології. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 33(72). № 5, 2022. С. 135-140. DOI: <https://doi.org/10.32872/2663-5941/2022.5/19>.
- Пахомова В. М., Павленко І. І. Дослідження параметрів якості визначення мережевих атак категорії PROBE з використанням самоорганізуючої карти. *SworldJournal*. 2022. Issue 11. Part 1. pp. 100-104. DOI: 10.30888/2663-5712.2022-11-01-022.
- Пахомова В. М., Квочка М. Ю. Визначення атак категорії Probe засобами багатощарової нейронної мережі. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 34(73). № 4, 2023. С. 93-98. <https://doi.org/10.32787/2663-5941/2023.4/15>.
- Zhukovyts'kyu I. V., Pakhomova V. M., Ostapets D. O., Tsyhanok O. I. Detection of attacks on a computer network based on the use of neural networks complex. *Science and Progress of Transport*. 2020, no. 5(89), pp. 68–79. doi: <https://doi.org/10.15802/stp2020/218318>.
- KDD Cup 1999 Data. *Intrusion detection dataset*. <http://kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99/kddcup99.html>
- Géron Aurélien. Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow concepts, tools, and techniques to build intelligent systems. *O'Reilly Media, Inc.* 2019. 856 p.
- Daython M. Scaling your data using scikit-learn scalers. *Medium*, 2020. Retrieved from <https://medium.com/@daython3/scaling-your-data-using-scikit-learn-scalers-3d4b584107d7>.
- Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V. Scikit-learn developers. Scikit-learn: machine learning in Python. *The Journal of Machine Learning Research*. 2011. Vol. 12. p.p. 2825-2830. Retrieved from <https://scikit-learn.org>.
- Alves Gisely. Discovering SOM, an unsupervised neural network. *Medium*, Dec 27, 2018. Retrieved from <https://medium.com/neuronio/discovering-som-an-unsupervised-neural-network-12e787f38f9>.
- Vesanto J., Alhoniemi E. Clustering of the Self-Organizing Map. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2000. Vol. 11. Iss. 3. p.p. 586-600. DOI: 10.1109/72.846731.

### References

- Pakhomova V. M., Masлак A. V. (2022). Network attack detection using KDDCup99 database and neuron fuzzy technology. *Vceni zapiski tavrisky natsionalnogo university imeni V.I. Vernadskogo. Seria: technical nauki*, Vol. 33(72), No. 5, pp. 135-140, DOI: <https://doi.org/10.32872/2663-5941/2022.5/19> [in Ukrainian].

2. Pakhomova V. M., Pavlenko I. I. (2022) Research of parameters of quality of definition of network attacks of the PROBE category with use of the Self organizing Map. *SworldJournal*, Vol. 11, Iss. 1, pp. 100-104, DOI: 10.30888/2663-5712.2022-11-01-022 [in Ukrainian].
3. Pakhomova V., Kvochka M. (2023). Definition of network attacks of PROBE category by means of multilayer neural network. *Vceni zapiski tavrisky natsionalnogo university imeni V.I. Vernadskogo. Seria: technical nauki*, Vol. 34(73), No. 4, pp. 93-98 [in Ukrainian].
4. Zhukovyts'kyi I. V., Pakhomova V. M., Ostapets D. O., Tsyhanok O. I. (2020). Detection of attacks on a computer network based on the use of neural networks complex. *Science and Progress of Transport*, No. 5(89), pp. 68–79, DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/218318> [in English].
5. KDD Cup 1999 Data. *Intrusion detection dataset*. Retrieved from <http://kdd.ics.uci.edu/databases/kddcup99/kddcup99.html> [in English].
6. Géron Aurélien (2019). Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow concepts, tools, and techniques to build intelligent systems. *O'Reilly Media, Inc*, 856 p. [in English].
7. Daython M. (2020). Scaling your data using scikit-learn scalars. *Medium*. Retrieved from <https://medium.com/@daython3/scaling-your-data-using-scikit-learn-scalars-3d4b584107d7> [in English].
8. Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V. (2011). Scikit-learn developers. Scikit-learn: machine learning in Python. *The Journal of Machine Learning Research*, Vol. 12, p.p. 2825-2830. Retrieved from <https://scikit-learn.org> [in English].
9. Alves Gisely. (2018). Discovering SOM, an unsupervised neural network. *Medium*. Retrieved from <https://medium.com/neuronio/discovering-som-an-unsupervised-neural-network-12e787f38f9> [in English].
10. Vesanto J., Alhoniemi E. (2000). Clustering of the Self-Organizing Map. *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol. 11, Iss. 3, pp. 586-600, DOI: 10.1109/72.846731 [in English].

І. Ф. ПОВХАН

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри програмного забезпечення систем  
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»  
ORCID: 0000-0002-1681-3466

А. В. ЛЕГЕЗА

викладач кафедри програмного забезпечення систем  
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»  
ORCID: 0000-0001-8416-8836

В. Я. САРОЗ

аспірант кафедри програмного забезпечення систем  
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»  
ORCID: 0009-0003-1628-2778

В. О. ЯКОВЛЕВ

аспірант кафедри програмного забезпечення систем  
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»  
ORCID: 0009-0000-0293-4614

## ЗАДАЧА ОЦІНКИ ЯКОСТІ НАВЧАЛЬНОГО КОНТЕНТУ

В роботі показані особливості організації онлайн навчання в межах освітнього простору, представлена технологія для оцінки загальної якості онлайн-курсу (електронного контенту) за допомогою інформаційної платформи дистанційного навчання. Сучасна освіта характеризується стійкою тенденцією переходу до цифровізації та персоніфікації навчання. Модернізація освіти в даний час пов'язана з впровадженням адаптивних, практико-орієнтованих і гнучких освітніх програм. У той же час, існуючі платформи для створення електронних навчальних курсів, поки не мають можливостей для інтелектуалізації процесу навчання, гнучкої адаптації змісту освіти під індивідуальні потреби учасників навчального процесу, не містять зручних інтелектуальних інструментів для підтримки розробників онлайн-курсів, автоматизації рутинних операцій зі структурування освітнього контенту. Представлена концепція персонального навчального середовища, яка формується за допомогою групи сервісів, заснованих на активній участі користувачів в процесі створення навчального контенту. Ці сервіси та служби отримали назву соціальних сервісів і представляють основу сучасної концепції Web 2.0/3.0. Виділена їх ключова ознака – використання колективного розуму, розподіленої інтелектуальної системи. Підкреслено, що навчальний процес з простої передачі даних, навчального контенту перетворюється в колективний процес створення контенту, який заснований на спільній роботі та всебічній комунікації. Учасники персональних навчальних середовищ навчаються створювати інформаційні зв'язки, комунікаційні лінії, самостійно добувати і передавати знання та користуватися ними. В роботі запропонована базова класифікація підходів оцінки якості онлайн курсів та електронного контенту, яку можна буде в перспективі доповнити та розширити. Показано, що в найпростішому випадку загальна процедура оцінювання, експертизи навчального курсу будується на математичній обробці оцінених експертами сукупності показників якості курсу (визначення важливості та інформативності показників, усередненні). Ефективні інтелектуальні алгоритми обробки даних лежать в основі розробки адаптивної технології онлайн-навчання впроваджені в навчальні процеси. Розроблені основні принципи синтезу системи оцінки якості онлайн-курсів.

**Ключові слова:** онлайн-навчання, LMS – платформа, розробка онлайн-курсу, дистанційне навчання, оцінка якості, Moodle.

I. F. POVKHAN

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Professor at the Department of Systems Software  
State University "Uzhgorod National University"  
ORCID: 0000-0002-1681-3466

A. V. LEGEZA

Lecturer at the Department of Systems Software  
State University "Uzhgorod National University"  
ORCID: 0000-0001-8416-8836

V. YA. SAROZ

Postgraduate Student at the Department of Systems Software  
State University "Uzhgorod National University"  
ORCID: 0009-0003-1628-2778

V. O. YAKOVLEV

Postgraduate Student at the Department of Systems Software  
State University "Uzhgorod National University"  
ORCID: 0009-0000-0293-4614

## THE TASK OF EVALUATING THE QUALITY OF EDUCATIONAL CONTENT

*The paper shows the features of organizing online learning within the educational space, presents a technology for assessing the overall quality of an online course (electronic content) using an information platform for distance learning. Modern education is characterized by a steady trend of transition to digitalization and personification of learning. Modernization of education is currently associated with the introduction of adaptive, practice-oriented and flexible educational programs. At the same time, existing platforms for creating e-learning courses do not yet have the ability to intellectualize the learning process, flexibly adapt the content of education to the individual needs of participants in the educational process, do not contain convenient intelligent tools to support developers of online courses, automate routine operations for structuring educational content. The concept of a personal learning environment is presented, which is formed using a group of services based on the active participation of users in the process of creating educational content. These services are called social services and represent the basis of the modern concept of Web 2.0/3.0. Their key feature is the use of a collective mind, a distributed intellectual system. It is emphasized that the educational process is transformed from a simple transfer of data and educational content into a collective process of content creation, which is based on collaboration and comprehensive communication. Participants in personal learning environments learn how to create information connections, communication lines, independently extract and transfer knowledge and use it. The paper offers a basic classification of approaches to assessing the quality of online courses and electronic content, which can be supplemented and expanded in the future. It is shown that in the simplest case, the general procedure for evaluating and examining a training course is based on mathematical processing of a set of course quality indicators evaluated by experts (determining the importance and informative value of indicators, averaging). Efficient intelligent data processing algorithms underlie the development of adaptive online learning technologies implemented in educational processes. The basic principles of synthesizing a system for evaluating the quality of online courses are developed.*

**Key words:** online learning, LMS platform, online course development, distance learning, quality assessment, Moodle.

### Постановка проблеми

На сучасному рівні розвитку ІТ технологій викладач в освітній установі в значній мірі спирається на готові або розроблені електронні курси дисциплін під час представлення нового матеріалу. Відмітимо, що такий підхід до подачі матеріалу дозволяє кожному учаснику процесу отримати набір базових знань та навички, використовуючи мережу та клієнт – серверну технологію. Базова вимога організації такої взаємодії об'єктів навчального процесу – це наявність доступу до мережі навчальної установи. Визначальною характеристикою Онлайн-навчання є глобальна доступність, актуальність контенту та швидкий обернений зв'язок між учасниками процесу [1,2]. Так академічна мобільність є одним з важливих напрямків розвитку сучасної освіти як в Україні, так і за кордоном і необхідна умова інтеграції освітньої організації в світовий освітній простір. Віртуальна академічна мобільність передбачає формування траєкторій навчання з використанням онлайн-курсів, які створені різними освітніми організаціями або розроблені на основі нових інформаційних технологій окремими фахівцями (за межами установ освіти), носіями визначених компетенцій, групами людей, неосвітніми організаціями. Індивідуалізація освітніх траєкторій дозволяє створити у студентів додаткову мотивацію до навчання, розширити горизонти освітніх можливостей, отримати унікальні професійні компетенції.

### Формулювання мети дослідження

Мета статті – дослідження особливостей, механізмів, методів та моделей організації онлайн навчання в Ужгородському національному університеті.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасна освіта характеризується стійкою тенденцією переходу до цифровізації та персоніфікації навчання. В роботах [1,2] розглянута центральна задача організації онлайн навчання в межах освітньої організації на базі відкритих LMS систем. В роботі [3] представлена загальна модель організації дистанційного навчання в межах концепції відкритого доступу платформи Learnme. Проблемам ефективності та адаптивності організації онлайн курсів в освітньому середовищі присвячені роботи [4,5]. Головною невирішеною проблемою тут залишається невисока універсальність такого підходу. Важливою задачею яка стає на етапі проектування моделі онлайн навчання залишається проблема вибору відповідної до умов організації LMS платформи [6]. Частковим вирішенням даної

задачі є розробка та проектування сучасних гібридних LMS платформ на базі штучного інтелекту. Дана проблематика тісно пов'язана з задачею простої та ефективної обробки/збору/аналізу статистичних даних (data mining) в процесі онлайн навчання [7]. Етап вибору LMS платформи пов'язаний з потребами освітньої організації, підтримкою системи відповідних освітніх стандартів [8-12]. Важливим напрямком розвитку сучасних платформ електронної освіти є застосування розподілених (cloud) технологій доступу до навчального контенту [13]. Принциповим недоліком такого підходу є високі вимоги щодо якості та розповсюдження інформаційної інфраструктури в межах освітньої організації.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

**Концепція персонального навчального середовища.** Під персональним навчальним середовищем (PLE) розуміється сукупність соціальних сервісів, програм, інформаційних матеріалів, що забезпечують віддаленому користувачеві інформаційної системи ефективний інструментарій навчання. Інакше кажучи, PLE – сукупність інструментів, необхідних віддаленому користувачеві, щоб знайти відповіді на питання, створити потрібний електронний контент навчання і проілюструвати досліджувані процеси (в межах навчального процесу).

Таким чином, ідея PLE полягає в тому, що віддалені користувачі повинні не тільки пасивно споживати інформацію, одержувану з обмеженого кола запропонованих ним джерел, а користуватися одночасно наборами інформаційних ресурсів, систематизувати і порівнювати отримані знання, і в результаті самостійно створювати нові джерела знань. Отже, PLE – це не конкретний додаток або служба, а особливий підхід до реалізації (планування та проектування) навчального процесу. При такому підході відповідальність за навчання лягає на плечі самих учасників навчання і вони самі направляють його хід, а це робить навчання більш цілеспрямованим та ефективним.

Персональні навчальні середовища формуються за допомогою групи сервісів, заснованих на активній участі користувачів в процесі створення контенту. Ці сервіси (служби) отримали назву – соціальних сервісів і представляють основу сучасної концепції Web 2.0. Відмітимо, що її ключова ознака – це використання колективного розуму (розподіленої інтелектуальної системи). Отже навчальний процес з простої передачі даних (навчального контенту) перетворюється в колективний процес створення контенту, який заснований на спільній роботі та всебічній комунікації. Учасники персональних навчальних середовищ навчаються створювати інформаційні зв'язки (комунікаційні лінії), самостійно добувати і передавати знання та користуватися ними (Рис. 1).

Сучасні соціальні теорії та соціальні сервіси (мережі) Web 2.0 створили нові можливості для комунікації і роботи в межах інформаційного простору. На основі цих можливостей, сервісів та служб сформувався потім аналогічний за назвою підхід e-Learning 2.0.

Відмітимо, що на сьогоднішній день визначені два принципово різні підходи до впровадження дистанційного навчання:

1. Навчальний процес на базі систем управління дистанційним навчанням (LMS платформ).
2. Навчальний процес на базі персональних навчальних середовищ (PLE середовище різних типів та реалізацій).

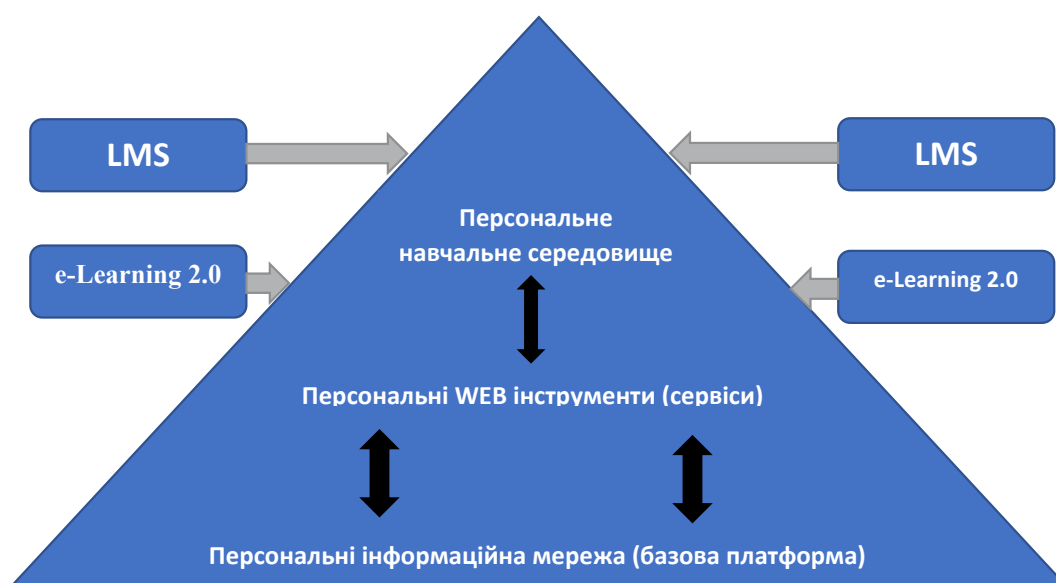


Рис. 1. Загальна схема персонального навчального середовища PLE (в межах підходу e-Learning 2.0)



На наш погляд, ефективне впровадження дистанційного навчання може ґрунтуватися на інтеграції (багаторівневою синтезі) персональних навчальних середовищ з LMS платформами.

Один з можливих варіантів даного підходу базується на використанні пакетів онлайн курсів і готових модулів в LMS (наприклад платформи WebCT, Blackboard, Ilias, Moodle). Відмітимо, загальною ідеєю LMS є те, що різні інструментальні засоби інтегровані в єдиний віртуальний простір. Користувачам (учасникам онлайн навчального процесу) потрібно витратити деякий час, щоб на практичних заняттях познайомитися з можливостями цих багатофункціональних платформ. Можна застосовувати і інший (особистісно-орієнтований) підхід, заснований на побудові комплексного LMS з набору більш простих веб-інструментів та засобів, керованих окремими учасниками навчального процесу. Тому синтез цих підходів забезпечує необхідну ефективність та цілеспрямованість впровадження дистанційного навчання у вищих навчальних закладах.

До мінімального набору сучасного PLE відносять онлайн сервіси двох рівнів: сервіси мікроблогів та сервіси соціальних мереж. Відмітимо, що до соціальних сервісів Web 2.0, за допомогою яких відбувається комунікаційна взаємодія (в межах PLE) учасників навчального процесу (центральне місце тут відводиться створенню електронного контенту), відносяться такі комунікативні платформи та онлайнві інструменти:

- Блоги та мікроблоги всіх типів.
- Персоналізована сторінки користувачів або персоналізований інтернет-портал (платформа), які реалізують взаємодію на основі інтерактивних інтерфейсів в межах клієнт-серверної архітектури.
- Сучасні соціальні мережі та системи соціальних презентацій всіх типів взаємодії та соціальних комунікацій.
- Інформаційні портали типу wiki-проектів (в межах даної платформи або подібної до неї).
- Інформаційні портали типу соціальних закладок (наприклад проекти типу [www.diigo.com](http://www.diigo.com), [www.delicious.com](http://www.delicious.com)).
- Глобальні мультимедійні системи розповсюдження контенту (в найпростішому випадку платформи типу YouTube).
- Онлайн платформи розподіленого доступу та редагування різноманітних документів (системи типу DocCreator).
- Онлайн платформи змішаного контенту (mashups&vicolage) – дозволяють формувати та комбінувати різні формати представлення даних.
- Онлайн платформи організації вебінарів всіх типів та інструментарію.
- Онлайн системи карт представлення знань – інструментарій зображення процесу загального системного мислення за допомогою схем (mindmap).
- Онлайн системи синдикації та нотифікації інформації (RSS сервіси) – дозволяють публікувати та транслювати контент.

Зауважимо, що методологія побудови PLE оточення на основі визначеного вище інструментарію базується на Cloud сервісах (для Web 3.0 акцент зміщується в блокчейн концепцію), що дає певні переваги:

- Загальний програмний інструментарій відстежується та контролюється.
- Процес управління версіями програмного забезпечення спрощено (в більшості випадків).
- Загальний комплекс задач інформаційної безпеки в значній мірі спрощується.
- Задачі управління контентом можна спростити за рахунок високої централізації та розподілених обчислень.
- Вимоги що апаратної частини клієнтських груп в значній мірі знижуються.

**Загальні моделі оцінки якості навчального контенту.** В межах цифровізації освітнього процесу, навчальний електронний курс є базовим елементом моделі електронного навчання (LMS платформи). Зрозуміло що кількість та різноманітність електронних курсів забезпечує високу варіативність та гнучкість освітньої програми. Онлайн-курси в межах LMS платформи можна використовувати в дистанційному і змішаному форматі навчання. Велика кількість розроблених, потенційно готових і вже використовуваних електронних дисциплін у вищій освіті ставить питання побудови ефективного механізму оцінки їх якості. Звернемо увагу, що модель оцінки якості онлайн курсу має передбачати ефективну роботу, як у вигляді автономної інформаційної системи, так і у межах окремої працюючої LMS платформи освітньої установи.

Онлайн курс, як і традиційний очний курс розробляється відповідно за програмою навчальної дисципліни, де визначені базові цілі його вивчення. Якщо після навчання на курсі цілі досягнуті, то курс оцінюється позитивно. Тоді можна припустити, що в цьому випадку електронний курс розглядається – як «чорна скриня» і саме це і буде первинна апостеріорна оцінка якості навчального контенту (онлайн курсу). З іншого боку, зрозуміло, що перш ніж запускати онлайн курс в LMS платформу, доцільно попередньо провести всебічну оцінку його спроможності, якості, цінності відносно навчального процесу в комплексі.

Зважаючи на все вище сказане, можна запропонувати наступну базову класифікацію підходів оцінки якості онлайн курсів, яку можна буде в перспективі доповнити та розширити.

- Оцінка якості електронного курсу за комплексною оцінкою: педагогічна, техніко-ергономічна, економічна, соціальна, цільова.
- Оцінка якості електронного курсу за методами визначення (підрахунку) отриманої кількісної оцінки експертами індикаторів (показників, атрибутів) якості: ручний, автоматизований, автоматичний, інтерактивний, інтелектуальний.

- Оцінка якості електронного курсу на основі представлення результату обробки індикаторів (атрибутів важливості) для прийняття заключного висновку – результат представляється у вигляді бального показника, множиною (або набором множин) показників оцінювання (на основі графічних елементів представлення – діаграм, графіків, зв’язаних таблиць).

- Оцінка якості електронного курсу за типом (класом оцінювання) учасників експертизи (за тим, хто оцінює курс: експерти, студенти, викладачі, стейкхолдери, бізнес агенти).

Відмітимо, що в найпростішому випадку загальна процедура оцінювання (експертизи) будується на математичній обробці оцінених експертами сукупності показників якості курсу (визначення важливості та інформативності показників, усередненні і т.д.). В даній схемі на початковому етапі формується базис (масив) ключових показників якості електронних курсів, які оцінюються експертами. Тобто формується робоча група експертів (їх може бути декілька), члени якої будуть проводити початкову оцінку якості курсу. На етапі формування в неї включаються фахівці різних напрямків: фахівці в оцінюваній області знань, методисти, програмісти, представники освітніх установ та зацікавлених сторін.

Зафіксуємо, що попередня експрес – оцінка якості онлайн курсу є необхідним та обов’язковим елементом якісної та повної оцінки навчального контенту. В межах навчального процесу це обумовлено різними обставинами, наприклад, є безліч курсів та електронних освітніх програм різних освітніх установ яким необхідно оцінити якість навчального контенту перед тим, як його використовувати.

Під якістю онлайн курсу (навчального контенту) будемо розуміти відповідність деякому фіксованому стандарту, який затверджується (узгоджується) професійним співтовариством (в широкому сенсі – не обов’язково державою). Якість навчання залежить від багатьох факторів, серед них якість навчального курсу, якість студентів, якість викладачів, якість програмного забезпечення та інформаційних компонент (мережі Інтернет та ін).

Онлайн курс (або дистанційний) представляє загальну інформаційну систему (LMS платформу), що забезпечує повний дидактичний цикл освітнього процесу (якісний контроль, функціонал комунікації між учасниками освітньої взаємодії). Загальний електронний курс (завершений компонент начального контенту) складається з ряду базових елементів (Рис. 2).

Отже зважаючи на все вище сказане можна зафіксувати наступну структуру довільного електронного курсу:

- Базовий компонент навчально-методичного комплексу (НМК).
- Програмне середовище – веб платформа або LMS (СДО) в яких може розташовуватись НМК.
- Комплексний набір сервісів WEB 2.0, які при необхідності використовуються в онлайн навчальному процесі.
- Програмне середовище для забезпечення всебічної комунікації в межах онлайн навчального процесу.



Рис. 2. Загальна структурна схема електронного курсу

Зафіксуємо, що якість онлайн курсів (онлайн навчального процесу в цілому) визначається складовими – якістю електронного контенту, компонентами НМК, комунікаційними процесами студентів та викладачів, якістю та ефективністю програмних середовищ та ін.

Зважаючи на все вище сказане можна запропонувати наступну загальну схему оцінки якості онлайн контенту, що складається з ряду етапів:

1. На першому етапі визначаються та фіксуються індикатори (показники, критерії, атрибути) якості (Q), що впливають на якість та ефективність онлайн курсу в цілому.

2. На наступному етапі, виділені індикатори кількісно оцінюються експертами (групами експертів та зацікавленими сторонами).

3. Після цього вводяться для кожного з відібраних індикаторів вагові коефіцієнти (q).

4. Далі отримані дані обробляються тим чи іншим способом на основі математичного апарату, щоб було зручно приймати рішення про ступінь відповідності стандарту (набору стандартів та внутрішніх вимог) якості.

5. На заключному етапі кінцеві результати можуть представлятися одним числовим показником, отриманим як сума добутків ( $q \cdot Q$ ). При невеликому числі індикаторів для наочності результат можна представити за допомогою діаграм (Рис. 3).



Рис. 3. Загальна структурна схема оцінки якості онлайн контенту (курсів)

З загальному випадку модуль НМК може представлятися набором наступних компонентів:

1. Загальний організаційний блок НМК (header).
  - Вступ (титольний лист), представлення онлайн курсу може бути як в текстовому так і відео форматі.
  - Анотація, структура курсу, комунікаційні посилання членів навчальної групи (форуми, соціальні мережі).
  - Загальна інструкція по використанню програмного забезпечення, комунікації представленого курсу (це може бути LMS, сервіси WEB 2.0 та ін.).
  - Методичні рекомендації з вивчення онлайн курсу.
  - Загальна програма курсу, опис змістовних модулів та контенту.
  - Формалізований сетикет (правила поведінки та спілкування під час вивчення онлайн курсу).
  - Перелік облікових записів, анкетні дані учасників онлайн навчання.
2. Загальний блок електронного контенту (body).
  - Текстові блоки з графікою, відео записи лекцій, вебінарів, блоки графічного контенту.
  - Онлайн трансляції лекцій, круглих столів, представлень контенту.
  - Трансляції вебінарів в реальному часі.
  - Структурований список ресурсів Інтернету (лінків) за тематикою онлайн курсу, в тому числі онлайн курси з відкритим доступом.
3. Блок практикумів (workshop).
  - Модуль семінарів.
  - Блок практичних завдань (реферати, курсові, есе, кейси та ін.).
4. Блок контролю (control).
  - Модуль тестування всіх типів.
  - Модуль підсумкового екзаменаційного контролю.
  - Модуль портфолію.
  - Модуль самоконтролю та взаємоконтролю.

## 5. Блок комунікації (communication).

- Модуль електронних консультацій.

• Модуль навчальної комунікації, наприклад, у форумі, призначеному для спілкування між студентами, викладачами та модераторами онлайн курсу.

Отже можемо зафіксувати – що систему сформованих вище параметрів можна вважати первинним стандартом, який можна використовувати:

1. В якості деякого інструментарію у самооцінки – він допоможе експертам оцінювати готові онлайн курси.
2. Для розробки нових онлайн курсів, в якості деякої опорної схеми (структурного алгоритму).

3. Як первинну схему – взірць, на базі якого може бути розроблений власний стандарт оцінки ефективності електронного курсу.

### Висновки

Електронне навчання передбачає використання комп'ютера або іншого електронного пристрою якимось чином для надання навчального контенту (довільного типу). Онлайн навчання має ряд переваг перед традиційним навчальним процесом. Отже, сам процес онлайн навчання може бути як асинхронним, так і синхронним: традиційно електронне навчання було асинхронним, що означає відсутність заздалегідь визначеного часу для початку занять. Кожен може брати участь в ньому у своєму власному темпі і не поспішаючи (учасники вивчають те, що їм потрібно знати, і тоді, коли їм це потрібно).

В роботі розроблено основні принципи організації навчального процесу на базі освітнього середовища. Представлені основні етапи синтезу системи оцінки якості електронного контенту. Процедури та критерії розробленої інформаційної системи оцінки якості навчального контенту:

- Апробацію методів розробки та оцінки онлайн-курсів.
- Розробку та впровадження протоколів проведення експертизи якості онлайн-курсів освітніми організаціями.
- Просування та популяризація дистанційної освіти, системи оцінки якості онлайн-курсів із залученням широкого кола освітніх організацій вищої освіти.

### Список використаної літератури

1. Kintonova A., Sabitov A., Povkhan I., Khaimulina D., Gabdreshov G. Organization of online learning using the intelligent metasystem of open semantic technology for intelligent systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 1(2-121). P. 29-40.
2. Kintonova A., Sabitov A., Povkhan I. Development of an Online Course for «Web Programming» discipline with OLAT. 2022 IEEE 7th International Energy Conference (ENERGYCON): Conference Proceedings (Riga (Latvia), May 9-12, 2022). Riga, 2022. P. 54-62.
3. Kintonova A., Povkhan I., Sabitov A., Tokkulyeva A., Demidchik N. Online Learning Technologies. 2022 IEEE 7th International Energy Conference (ENERGYCON): Conference Proceedings (Riga (Latvia), May 9-12, 2022). Riga, 2022. P. 76-84.
4. Alt D., Naamati-Schneider L. Health management students' self-regulation and digital concept mapping in online learning environments. *BMC Medical Education*. 2021. Volume 21, Issue 1. Article Number 110.
5. Ferrer N. F., Alfonso J. M. E-Learning Content Management. New York (USA): Springer, 2010. 132 p.
6. How E-learning Platforms Are Gaining Popularity In The Ecommerce Industry. Punjab (India): FATbit Technologies, 2024. URL: <https://www.fatbit.com/fab/online-learning-vs-traditionallearning-a-study-on-elearning-platform/>
7. Pappas C. Top 20 eLearning Statistics For 2019 You Need To Know [Infographic]. Reno (NV, USA): eLearning Industry, 2019. URL: <https://elearningindustry.com/top-elearning-statistics-2019>
8. Siegel K. iSpring Suite 9: The Basics. Riva (USA): IconLogic, Inc., 2020. 119 p.
9. Caudill B., Banks D. Pocket instruction for SCORM. West Palm Beach (Florida, USA): JCASolutions, 2006. 114 p.
10. What is AICC. London (UK): Growth Engineering Technologies, 2022. URL: <https://www.growthengineering.co.uk/what-is-aicc/>
11. Revilova O., Santos O., Restrepo E. G. WCAG 2 in simple terms. Madrid (Spain): Itákora Press, 2015. 53 p.
12. Blokdruk G. A clear and concise XAPI reference. Toronto (Canada): 5STARCOoks, 2018. 137 p.
13. Masud Md., Huang X. An E-learning System Architecture based on Cloud Computing. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2012. Vol. 62. P.74-78.
14. Chiasson A. Mastering Articulate Storyline. Birmingham (UK): Packt Publishing, 2016. 28 p.
15. Education at a Glance 2011. Paris (France): OECD Publishing, 2011. 320 p.
16. Ruiz-Corbella M., Alvarez-Gonzalez B. Virtual Mobility as an Inclusion Strategy in Higher Education: research on Distance Education Master degrees in Europe, Latin America and Asia. *Research in Comparative and International Education*. 2014. Vol. 9, Iss. 1. P. 165-180.
17. Wit H. de., Ferencz I., Rumbley L. E. International student mobility: European and US perspectives. *Perspectives: Policy and Practice in Higher Education*. 2013. Vol. 17, Iss. 1. P. 17-23.

**Н. А. ПОТАПОВА**

кандидат економічних наук, доцент,  
доцент кафедри інформаційних технологій  
Донецький національний університет імені Василя Стуса  
ORCID: 0000-0003-4566-4102

**Л. О. ВОЛОНТИР**

кандидат технічних наук, доцент,  
викладач спеціальних дисциплін  
Вінницький технічний фаховий коледж  
ORCID: 0000-0001-9022-9332

**О. В. ЗЕЛІНСЬКА**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри інформаційних технологій  
Донецький національний університет імені Василя Стуса  
ORCID: 0000-0002-9069-1428

## АПРОКСИМАЦІЯ ФУНКЦІЙ ПРИЧИННО-НАСЛІДКОВИХ ЗВ'ЯЗКІВ МЕТРИК ВИРОБНИЦТВА В АНАЛІЗІ ДАНИХ ГАЛУЗІ ТВАРИННИЦТВА

У статті висвітлюються питання побудови та аналізу математичних моделей отриманих апроксимаційою функцій, що відображують причинно-наслідкові зв'язки метрик виробництва галузі тваринництва економіки сільського господарства. Основна гіпотеза дослідження полягає у визначенні істотності впливу на обсяги виробництва м'яса таких чинників, як-от: приплід телят, приплід поросят та середньорічний удій молока. Підтвердження даної гіпотези є можливим за рахунок наближеного оцінювання функцій, які описують причинно-наслідковий зв'язок між метриками виробництва галузі тваринництва. Сутність причинно-наслідкового зв'язку ідентифікується за допомогою множини метрик на скінченній вибірці статистики даних, отриманій в динаміці за 2010–2020 р.

Набори даних для дослідження попередньо оцінені описовим аналізом статистики, який підтвердив незначний розкид даних навколо очікуваних середніх значень.

Ключовими характеристиками розміру ступеня розсіювання значень обрано коефіцієнт варіації та кореляції. Послідовність впливу метрик оцінено на основі значимості параметрів апроксимованих методом найменших квадратів парних та багатофакторних функцій. Алгоритм запропонованої оцінки показує, яким чином відбувається поетапність визначення істотності впливу метрик та отримання кінцевого значимого результату. Експеримент виявив метрики (приплід телят та середньорічний удій молока), значимість яких не відповідала оцінці  $t$ -критерію Ст'юдента і в підсумку не становили сутність причинно-наслідкового впливу. Результативність впливу фактору приплід поросят підтверджено оцінкою значимості параметрів апроксимації степеневої функції.

**Ключові слова:** моделювання, наближена оцінка, метрика, апроксимація, причинно-наслідковий зв'язок, значимість.

**N. A. POTAPOVA**

Ph.D. in Economics, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Information Technology  
Vasyl' Stus Donetsk National University  
ORCID: 0000-0003-4566-4102

**L. O. VOLONTYR**

Ph.D. in Engineering, Associate Professor,  
Lecturer of Special Disciplines  
Vinnytsia Technical Applied College  
ORCID: 0000-0001-9022-9332

**O. V. ZELINSKA**

Ph.D. in Engineering, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Information Technology  
Vasyl' Stus Donetsk National University  
ORCID: 0000-0002-9069-1428

## APPROXIMATION OF FUNCTIONS OF CAUSE-EFFECT RELATIONSHIPS OF PRODUCTION METRICS IN THE ANALYSIS OF DATA IN THE LIVESTOCK INDUSTRY

*The article highlights the issues of building and analyzing mathematical models obtained by approximation of functions that reflect cause-and-effect relationships of production metrics in the livestock sector of the agricultural economy. The main hypothesis of the study is to determine the significance of the influence on the volume of meat production of such factors as: offspring of calves, offspring of piglets, and average annual milk production. Confirmation of this hypothesis is possible due to the approximate evaluation of the functions that describe the cause-and-effect relationship between the production metrics of the livestock industry. The essence of the causal relationship is identified using a set of metrics on a finite sample of data statistics obtained in the dynamics for 2010–2020.*

*The data sets for the study were previously evaluated by descriptive statistics analysis, which confirmed a small scatter of the data around the expected mean values.*

*The coefficient of variation and correlation were chosen as the key characteristics of the size of the degree of dispersion of values. The sequence of metric influence was assessed based on the significance of parameters approximated by the least squares method for paired and multifactor functions. The algorithm of the proposed evaluation demonstrates the step-by-step process of determining the significance of metric impact and obtaining the final meaningful result. The experiment revealed metrics (calf progeny and average annual milk yield), the importance of which did not correspond to the Student's *t*-test assessment and, as a result, did not constitute the essence of the causal effect. The effectiveness of the influence of the piglet offspring factor was confirmed by the evaluation of the significance of the parameters of the approximation of the power function.*

**Key words:** modeling, approximate estimation, metric, approximation, causality, significance.

### Постановка проблеми

Моделювання є одним із методів аналізу даних, в основу якого закладено процес сприйняття та ідентифікації сукупності процесів прикладної предметної області. Складні закономірності можуть бути оцінені за допомогою моделювання з метою виявлення найбільш дієвих факторів та наслідків їх впливу і є обґрунтуванням для побудови подальших управлінських рішень [1]. Встановлення причинно-наслідкових зв'язків в межах предметної області окреслюється обмеженнями включення факторів, внаслідок яких виникає проблема оцінювання дисперсії та варіації даних. Більшість прикладних задач використовують набори даних, отриманих під час експерименту, або із публічних джерел. Генерація цих даних обумовлена виникненням процесів стохастичної природи і впливає на формалізований опис моделі системи та її аналіз. Тому дослідження підходів щодо апроксимації функцій для встановлення опису форми сукупності даних та їх наближеного оцінювання залишається актуальним, що надає змогу фахівцям різних галузей отримати можливі варіанти чисельних оцінок функцій та використати їх в реальних планах та прогнозах.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Висвітлення питань апроксимації даних знайшло відображення в працях багатьох дослідників [1, 2]. При оцінці використовуються різні форми подання кривих. У роботах [3, 6] приведені підходи та методи алгоритмізації інтерполяції та апроксимації даних. В роботі [4] наведено результати розробки методики та алгоритм визначення параметрів апроксимованих функцій в технологічних процесах, зокрема електронно-променевих технологій для оцінки потенційних можливостей електронного пучка з метою їх подальшого використання в виробничих процесах зварювання та обробки металів.

В роботі [8] виконано апроксимацію логарифмічної та степеневі функцій за методом найменших квадратів для оцінки середніх квадратичних похибок площ земельних ділянок. Проте, розв'язок прикладних задач залишає невирішеними системні питання методики оцінювання, особливо в контексті роботи з даними та їх ідентифікацією в кінцевій специфікації моделі, яка підлягатиме дослідженню.

### Формулювання мети дослідження

Метою статті є розробка концептуальних підходів побудови та методики аналізу математичних моделей отриманих апроксимацією функцій, що відображують причинно-наслідкові зв'язки метрик виробництва галузі тваринництва економіки сільського господарства.

### Викладення основного матеріалу

Ефективність галузі тваринництва суттєво впливає на рівень продовольчої безпеки та ресурсозабезпеченість переробки м'яса. Основними напрямками тваринництва України є: скотарство, свинарство, птахівництво та інші. Основною продукцією галузі скотарства є молочна та м'ясна продукція. В структурі виробництва галузі нараховується 65 % умовного продуктивного поголів'я худоби. Існують різні напрями спеціалізації, як-от: молочний, молочно-м'ясний, м'ясний і м'ясомолочний. Галузь тваринництва на сьогодні є мало ефективною, що обумовлює необхідність використання нових підходів на різних рівнях управління з урахуванням впливу вагомих індикаторів виробництва продукції.

Обсяг виробництва продукції тваринництва один з основних індикаторів галузі тваринництва. Даний фактор є ключовим важелем у формуванні пропозиції на ринку сировини та продукції переробки. Тому доцільним

є ідентифікувати його відповідною метрикою набору даних. Аналіз вибірки даних по цій метриці дозволить виявити додаткові можливості росту обсягів виробництва продукції, поліпшення її асортименту, якості та зменшення втрат. Описовий аналіз даних основних метрик оцінки виробництва м'яса для апроксимації функції причинно-наслідкового зв'язку наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

## Описовий аналіз даних основних метрик виробництва м'яса

№ періоду	у, виробництво м'яса (у живій вазі), тис. т	x <sub>1</sub> , вихід приплоду телят на 100 корів, голів	x <sub>2</sub> , вихід приплоду поросят на 100 основних свиноматок, голів	x <sub>3</sub> , середній річний удій молока від однієї корови, кг
1	2925,4	73	1530	4104
2	3031,8	72	1654	4203
3	3120,9	73	1863	4337
4	3379,6	76	1928	4398
5	3323,5	75	2047	4508
6	3270,4	71	2058	4644
7	3271,6	70	1955	4735
8	3266,9	69	1919	4820
9	3318,1	67	2181	4922
10	3493,6	64	2126	4976
11	3461,7	66	2352	5129
Середнє значення	3260,32	70,55	1964,82	4616,00
Дисперсія	27330,39	12,98	48877,60	101155,27
Середньоквадратичне відхилення	165,32	3,60	221,08	318,05
Коефіцієнт варіації	5,07	5,11	11,25	6,89

Джерело: складено та розраховано авторами на основі [10, 11, 12]

Для оцінки мінливості набору даних використано коефіцієнт варіації. Коефіцієнт варіації застосовується тоді, коли необхідно порівняти мінливість ознак об'єкта, які виражені в різних одиницях вимірювання. Він розраховується за формулою:

$$v = \frac{S_x}{\bar{x}}, \quad (1)$$

де  $S_x$  – середнє квадратичне відхилення даних по метриці  $x$ ,

$\bar{x}$  – середнє значення.

Мінливість вважається слабкою, якщо  $v < 10\%$ ; якщо  $v$  від 11–25%, середньою і значною за  $v > 25\%$ . Якщо коефіцієнт варіації менше 33,3%, то статистична вибірка є однорідною. Статистичні вибірки  $u$ ,  $x_1$ ,  $x_3$  мають слабку мінливість, а вибірка змінної  $x_2$  має середню мінливість, тобто вибірка є однорідною.

Обсяг валової продукції тваринництва залежить від ряду факторів. При оцінюванні прихованого стохастичного впливу доцільно використовувати апроксимацію функції, яка описує причинно-наслідковий зв'язок між кількісними факторами виробництва обсягів м'яса з урахуванням різних напрямів спеціалізації. Початковий аналіз даних передбачає побудову та оцінювання парних моделей з використанням функції апроксимації за методом найменших квадратів по наступній специфікації метрик:

$$\begin{aligned} y &= f(x_1) \\ y &= f(x_2) \\ y &= f(x_3) \end{aligned} \quad (2)$$

де  $y$  – метрика оцінки виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України, тис. т;

$x_1$  – метрика оцінки виходу приплоду телят на 100 корів у сільськогосподарських підприємствах, голів;

$x_2$  – метрика оцінки виходу приплоду поросят на 100 основних свиноматок у сільськогосподарських підприємствах, голів;

$x_3$  – метрика оцінки середнього річного удою молока від однієї корови, кг.

Розкид початкових масивів даних вказаних метрик доцільно оцінити лінійним коефіцієнтом кореляції та значимістю параметрів функції, розрахованих за методом найменших квадратів (МНК) [7]. Оцінка лінійного коефіцієнту кореляції наступна:

- $r(u, x_1) = -0,4921$ , зв'язок між факторами слабкий, напрям – обернений;
- $r(u, x_2) = 0,8960$ , зв'язок між факторами сильний, напрям – прямий;
- $r(u, x_3) = 0,8296$ , зв'язок між факторами сильний, напрям – прямий;

- $r(x_1x_2) = -0,5784$ , зв'язок між факторами слабкий, напрям – обернений;
- $r(x_2x_3) = 0,8965$ , зв'язок між факторами середній, напрям – прямий;
- $r(x_1x_3) = -0,8215$ , зв'язок між факторами сильний, напрям – обернений.

Кореляція по деяких парах значень метрик показує тісний зв'язок між наборами даних. Велику колінеарність викликає метрика  $x_3$ , яка пояснюється її природою. Тобто, технологічно витрати молока на прикорм молодняка є складовою формування основного стада великої рогатої худоби, тому зворотній зв'язок між цими категоріями є очікуваним.

Припущення про мультиколінеарність може спростувати оцінка значимості параметрів функції багатьох змінних. В загальному, множинна модель будується виходячи із припущень специфікації. Зв'язок теоретичної оцінки за побудованою моделлю та фактичним значенням метрик продукції тваринництва описує рівняння:

$$y = \hat{y} + e \quad (3)$$

де  $y$  – фактичне значення обсягу виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України, тис. т;

$\hat{y}$  – оцінене наближене значення обсягу виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України, тис. т;

$e$  – похибка результатів.

Лінійна форма парної моделі у загальному вигляді наступна:

$$\hat{y} = \hat{b}_{0i} + \hat{b}_{1i}x_i, \quad i = \overline{1,3} \quad (4)$$

де  $\hat{y}$  – метрика обсягу виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України оцінена за методом найменших квадратів, тис. т;

$b_i$  – параметр рівняння обчислений за методом найменших квадратів.

Перевірка тісноти загального зв'язку (впливу) незалежних факторів на результуючий здійснюється на основі коефіцієнта детермінації за формулою:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5)$$

Перевірка статистичної значущості моделі здійснюється на основі  $F$ -статистики, яка обчислюється за формулою:

$$F_{\text{експ}} = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{n - m - 1}{m} \quad (6)$$

Табличне значення  $F(m, n - m - 1, \pm)$  порівнюється з обчисленою  $F$ -статистикою. У випадку коли  $F_{\text{експ}} > F(m, n - m - 1, \pm)$ , то гіпотеза про рівність нулю всіх коефіцієнтів рівняння відхиляється, інакше приймається.

В аналізі даних доцільною є перевірка значимості оцінок параметрів моделі та знаходження їх довірчих інтервалів. За умови що залишки моделі розподілені за нормальним законом розподілу вважаємо, що параметри моделі також задовольняють нормальному закону розподілу. Перевірку гіпотези про значимість оцінок параметрів моделі проводять за  $t$ -критерієм Стьюдента:

$$t_{i\alpha} = \frac{|b_i|}{S_{\hat{b}_i}}, \quad (7)$$

Обчислене значення  $t$ -критерію порівнюється з табличним при вибраному рівні значимості та відповідної кількості ступенів вільності. Якщо  $t_{\text{розрахункове}} > t_{\text{критичного}}$ , то оцінка значимості відповідного параметра моделі є достовірною. На підставі  $t$ -критерію і стандартної помилки встановлюються довірчі інтервали для параметрів моделі  $b_i$ :

$$b_i - t_b S_{\hat{b}_i} \leq b_i \leq b_i + t_b S_{\hat{b}_i} \quad (8)$$

Оцінка впливу значень метрики  $x_1$  на значення метрики  $y$  описується оціненим рівнянням:

$$\hat{y} = 4853.59 - 22.58 \cdot x_1 \quad (9)$$

( $p$ -значення  $b_{0i}=0,0006$ ) ( $p$ -значення  $b_{1i}=0,1241$ )

За отриманими оцінками, збільшення значень метрики  $x_1$  на 1 одиницю вимірювання викликає зменшення значень метрики  $y$  на 22,58 одиниці її вимірності (тобто обсяг виробництва м'яса має зменшитись на 22,58 тис. т) Рівняння має низький рівень значимості оцінюваних параметрів, тобто значимість параметру  $b_{1i}$  оцінено на рівні 12,4%.



При оцінюванні за критерієм Ст'юдента критичне значення t-критерію ( $t_{кр}$ ) при  $f_1=9$  (ступені вільності) дорівнює 2,26. Для даної оцінки  $t_{кр} < t_{розрах}$ , розрахунковий t-критерій Ст'юдента ( $t_{розрах}$ ) дорівнює -1,6959, тобто даний фактор  $x_1$  не є значимий при оцінці його впливу на метрику у. Лінійний коефіцієнт кореляції 0,49 характеризує низький рівень тісноти зв'язку між наборами даних та обернений напрям. Лінійний коефіцієнт детермінації показує, що набір даних метрики  $x_1$  обумовлений 24,2% варіації впливу у сукупній варіації даних у, тобто 76,8% варіації набору даних метрики у обумовлено іншими складовими специфікації. Оцінка впливу метрики  $x_2$  на метрику у описується рівнянням:

$$\hat{y} = 1943.8 + 0.67 \cdot x_2 \quad (10)$$

(р-значення  $b_{02}=0,000009$ ) (р-значення  $b_{12}=0,0019$ )

За отриманими розрахунками зростання значень метрики  $x_2$  на 1 одиницю вимірності веде до збільшення значень метрики у на 0,67 одиниць її вимірювання. Визначено високий рівень значимості оцінюваних параметрів, тобто значимість параметру  $b_{12}$  оцінено на рівні 0,19%. При оцінюванні за критерієм Ст'юдента показано, що критичне значення t-критерію ( $t_{кр}$ ) при  $f_1=9$  (ступені вільності) дорівнює 2,26. Для даної оцінки параметру  $t_{кр} < t_{розрах}$ , розрахунковий t-критерій Ст'юдента ( $t_{розрах}$ ) дорівнює 6,05, тобто метрика  $x_2$  є значимою при оцінці її впливу на у (обсяг виробництва м'яса). Лінійний коефіцієнт кореляції 0,89 характеризує високий рівень тісноти зв'язку між наборами даних з прямим напрямом впливу. Лінійний коефіцієнт детермінації показує, що метрика  $x_2$  має 80,3% варіації впливу у сукупній варіації значень метрики у (обсягу виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України), тобто 19,7% варіації значень у обумовлено іншими даними.

Оцінка впливу метрики  $x_3$  (середній річний удій молока від однієї корови, кг) на метрику у (обсяг виробництва м'яса у живій вазі) описується рівнянням:

$$\hat{y} = 1269.6 + 0.43 \cdot x_3 \quad (11)$$

(р-значення  $b_{03}=0,019$ ) (р-значення  $b_{13}=0,0016$ )

Отримані розрахунки показали, що зростання значень метрики у на 0,43 одиниць вимірності обумовлено збільшенням значень метрики  $x_3$  на 1 одиницю вимірності. Визначено високий рівень значимості оцінюваних параметрів, тобто значимість параметру  $b_{13}$  оцінено на рівні 0,16%. При оцінюванні за критерієм Ст'юдента показано, що критичне значення t-критерію ( $t_{кр}$ ) при  $f_1=9$  (ступені вільності) дорівнює 2,26. Для даної оцінки параметру  $t_{кр} < t_{розрах}$ , розрахунковий t-критерій Ст'юдента ( $t_{розрах}$ ) дорівнює 4,46, тобто метрика  $x_3$  є значимою при оцінці її впливу на обсяг виробництва м'яса (метрика у). Лінійний коефіцієнт кореляції 0,83 характеризує високий рівень тісноти зв'язку між даними вказаних метрик з прямим напрямом впливу. Лінійний коефіцієнт детермінації показує, що метрика  $x_3$  має 68,8% варіації впливу у сукупній варіації у (обсягу виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України), тобто 32,2% варіації метрики у обумовлено іншими даними.

З урахуванням найбільш значимих метрик  $x_2$  та  $x_3$  двофакторна модель впливу їх значень на метрику у має вигляд:

$$\hat{y} = 1798,5 + 0,58 \cdot x_2 + 0,07 \cdot x_3 \quad (12)$$

За отриманою моделлю маємо характеристику змін показника обсягу виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України в тис. т (метрика «у»):

- при зростанні виходу приплоду порослят на 100 основних свиноматок у сільськогосподарських підприємствах (метрика  $x_2$ ) на 1 голову, обсяг виробництва м'яса у живій вазі збільшиться (метрика у) на 0,58 тис. т;
- при зростанні середнього річного удою молока від однієї корови у сільськогосподарських підприємствах (метрика  $x_3$ ) на 1 кг обсяг виробництва м'яса у живій вазі (метрика у) збільшиться на 0,07 тис. т.

Всі обрані метрики мають позитивний вплив на результативну ознаку і сприяють її зростанню. Отримана модель є значимою, що підтверджується значенням множинного коефіцієнту детермінації  $R^2 = 0,8064$ . Метрики  $x_i$  мають 80,6% впливу на результуючу «у», а інші 19,6% впливу належать метрикам не врахованим у моделі. Множинний коефіцієнт кореляції  $r(y, x_2, x_3)$  дорівнює 0,8980, що свідчить про високий рівень тісноти зв'язку між наборами даних. Модель є адекватною, що підтверджується розрахунком F-статистики Фішера.  $F_{розрах} \geq F_{теор}$  ( $\alpha=0,05$ ,  $df_1=2$ ,  $df_2=8$ ), тобто  $16,661 \geq 4,46$ .

Значимість параметрів моделі регресії підтверджується оцінкою t-статистики Ст'юдента при ступенях вільності ( $n-1-2$ ,  $\alpha=0,05$ ), тобто (8,  $\alpha=0,05$ )  $t_{теор} = 2,3060$ . При сумісній оцінці за лінійною формою функції апроксимації дані метрики є не значимими при  $t_{теор}$  (8; 0,05) = 2,3060 [4, 8]:

- $b_0: t_{розрах} (4,0489) \geq t_{теор} (2,3060)$  – значимий;
- $b_1: t_{розрах} (2,2087) \geq t_{теор} (2,3060)$  – не значимий;
- $b_2: t_{розрах} (0,3823) \geq t_{теор} (2,3060)$  – не значимий.

При оцінці нелінійної форми функції апроксимації залежності між метриками отримано рівняння:

$$\hat{y} = 100.5 \cdot x_2^{0,33} \cdot x_3^{0,11} \tag{13}$$

При зведенні функції апроксимації до лінійної форми отримано оцінку коефіцієнту детермінації 0,83, а лінійного коефіцієнту кореляції 0,91. Модель є статистично значимою. Слід зазначити, що сумісний вплив метрик створює ефект нелінійного росту для фактору виробництва м'яса. При зростанні на 1% приплоду поросят на 100 основних свиноматок у сільськогосподарських підприємствах ( $x_2$ ) очікується збільшення обсягу виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України на 0,33%. При зростанні на 1% середнього річного удою молока від однієї корови у сільськогосподарських підприємствах ( $x_3$ ) на 1% очікується збільшення обсягу виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України на 0,11%. Проте за оцінку значимості параметрів отримано:  $b_0$  (100,5), ( $p=0,0004$ ) – значимий;  $b_1$  (0,33), ( $p=0,0371$ ) – значимий;  $b_2$  (0,11), ( $p=0,7521$ ) – не значимий.

Оцінка адекватності за критерієм Фішера показала, що дана модель є адекватною.  $F_{крит}=4,46$  при рівні значимості 0,05, ступенях вільності  $f_1=2$  та  $f_2=8$ .  $F_{розр}=19,71$ , тобто  $F_{розр} \geq F_{крит}$ . Оцінка відхилень теоретичних та фактичних значень моделі наведена у таблиці 2.

Таблиця 2

Оцінка похибки математичної моделі  $\hat{y} = 100.5 \cdot x_2^{0,33} \cdot x_3^{0,11}$

№ періоду часового періоду (t)	y	$\hat{y}$	$\Delta$ , %
1	2925,4	2963,9	1,315
2	3031,8	3050,2	0,606
3	3120,9	3185,0	2,055
4	3379,6	3226,8	4,521
5	3323,5	3301,1	0,673
6	3270,4	3318,1	1,459
7	3271,6	3268,8	0,085
8	3266,9	3255,1	0,361
9	3318,1	3405,3	2,627
10	3493,6	3380,5	3,238
11	3461,7	3508,4	1,349
Сума	*	*	18,289
МАРЕ:	*	*	1,663

Джерело: складено та розраховано авторами на основі [10, 11, 12]

Абсолютна середня процентна помилка моделі (МАРЕ) [3] становить 1,663%, що підтверджує низький рівень похибки розрахованої моделі. Виходячи із отриманих характеристик довірчих інтервалів змін параметрів отриманої моделі, можна визначити, що обсяг виробництва м'яса має незначні коливання.

Проведена оцінка за лінійною формою показала, що серед отриманих параметрів значимим є метрика приплоду поросят на 100 основних свиноматок у сільськогосподарських підприємствах ( $x_2$ ), що дозволяє викреслити із кінцевого аналізу даних метрику  $x_3$  (середній річний удій молока від однієї корови у сільськогосподарських підприємствах) і отримати кінцеву парну нелінійну модель в залежності: обсяг виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України (метрика y) ← приплід поросят на 100 основних свиноматок у сільськогосподарських підприємствах (метрика  $x_2$ ). Така модель матиме вигляд степеневі функції:

$$\hat{y} = 160,59 \cdot x_2^{0,397} \tag{14}$$

За даною моделлю, при збільшенні на 1% приплоду поросят на 100 основних свиноматок у сільськогосподарських підприємствах обсяг виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України зростає на 0,397%. Оцінка довірчих інтервалів на рівні значимості 0,05 показала, що довірчі інтервали отриманих значень мають межі:  $53,52 \leq b_0 \leq 435,23$ ;  $0,26 \leq b_1 \leq 0,54$ . Результати оцінювання наведено у таблиці 3.

Зазначимо, що при проведенні аналізу даних по метриках виробництва продукції тваринництва шляхом поетапного виключення незначимих метрик, була отримана модель пріоритетного впливу технологічного фактору виробництва м'яса свинини на загальний обсяг виробництва м'яса у живій вазі сільськогосподарськими підприємствами. Відносна похибка оцінювання по усій вибірці даних коливається у межах  $0,388\% \leq \Delta \leq 4,102\%$ , тобто менше порогу у 10%. Абсолютна середня процентна помилка моделі МАРЕ дорівнює 1,71%.

Таблиця 3

Оцінка похибки математичної моделі  $\hat{y} = 160,59 \cdot x_2^{0,397}$ 

№	y	x <sub>2</sub>	$\hat{y}$	Δ, %
1	2925,4	1530	2956,6	1,065
2	3031,8	1654	3049,5	0,584
3	3120,9	1863	3197,1	2,442
4	3379,6	1928	3241,0	4,102
5	3323,5	2047	3319,0	0,136
6	3270,4	2058	3326,1	1,702
7	3271,6	1955	3258,9	0,388
8	3266,9	1919	3234,9	0,978
9	3318,1	2181	3403,7	2,578
10	3493,6	2126	3369,3	3,558
11	3461,7	2352	3507,3	1,316
МАРЕ:				1,713557

Джерело: складено та розраховано авторами на основі [10, 11, 12]

### Висновки

Застосування методу апроксимації функцій в прикладних задачах дослідження обумовлено наявністю сформованих наборів даних в ході проведення експериментальних спостережень. Методика отримання подібних оцінок включає поетапне проведення апроксимацій функцій по усіх можливих порівняннях варіантів значимості впливів факторів на ідентифіковану результативну ознаку. Значимість параметрів апроксимованих функцій ґрунтується на математичній теорії підтвердження гіпотез. В межах такого оцінювання в кінцевому варіанті мають залишитись лише ті фактори, метрики яких дозволили отримати статистично значимі параметри апроксимованих функцій. У разі повної статистичної незначимості параметрів необхідним є перехід до повторної ідентифікації факторів в межах специфікації моделі новими метриками і проведення нового етапу аналізу даних.

Дослідження оцінки змін виробництва продукції тваринництва по метриці фактору обсягу виробництва м'яса (у живій вазі) в сільському господарстві України у розрізі сільськогосподарських підприємств показало, що найбільш результативною оцінкою є вплив приплоду поросят на 100 основних свиноматок. Залежність має нелінійну форму степеневі функції, зміна параметрів якої може залежати від часових збурень та утворених лагів запізнь. Тому, дані задачі можуть бути перспективними для поставки завдань аналізу даних галузі тваринництва.

### Список використаної літератури

1. Потапова Н.А. Економетричний аналіз причинно-наслідкових зв'язків компонентів структури реалізації зернових культур в збутовій агрологістичі. Формування ринкової економіки в Україні: Збірник наукових праць. 2017. Випуск 38. С. 139-145.
2. Потапова Н.А., Волонтир Л.О., Частоколенко І.П., Григоренко М.С. Метод інтерполяції для прогнозування метрик використання хмарних обчислень в статистичному навчанні. Наука і техніка сьогодні. 2024. № 4(32). С. 1192-1205. URL: <http://perspectives.pp.ua/index.php/nts/article/view/10943>.
3. Волонтир Л.О., Зелінська О.В., Потапова Н.А., Чіков І.А. Чисельні методи. Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 2020. 322 с.
4. Мельник І.В., Починок А.В. Порівняльний аналіз методів інтерполяції та апроксимації граничної траєкторії короткофокусного електронного пучка за умови його транспортування в іонізованому газі. Вісник Університету «Україна». Серія: інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика. 2020. № 1 (24). С. 106-123.
5. Tolochko O.I., Palis Stefan, Burmelov O.O., Kaluhin D.V. Discrete approximation of continuous objects with Matlab. Applied Aspects of Information Technology. 2021. Vol.4 №.2. pp. 178-191.
6. Бахрушин В.Є. Методи аналізу даних: навчальний посібник для студентів. Запоріжжя: КПУ, 2011. 268 с.
7. Кузьмин В.М., Заліський М.Ю., Климчук В.П. Побудова математичних моделей з використанням полісегментної регресії. Наукоємні технології. 2020. № 1(45). С. 11-18.
8. Рябчий В.В., Трегуб М.В. Апроксимація функцій середніх квадратичних похибок площ земельних ділянок для визначення їх допустимих значень. Геодезія, картографія і аерофотознімання. 2014. Вип. 79. 54-67.
9. Офіційний сайт Державної служби статистики України. [www.ukrstat.gov.ua](http://ukrstat.gov.ua). URL: <http://ukrstat.gov.ua/>.
10. Статистичний збірник «Тваринництво України за 2013». Київ: Державна служба статистики України. 2014. 212 с.
11. Статистичний збірник «Тваринництво України за 2018». Київ: Державна служба статистики України. 2019. 166 с.
12. Статистичний збірник «Тваринництво України за 2018». Київ: Державна служба статистики України. 2021. 160 с.

## References

1. Potapova N.A., Volontyr L.O., Chastokolenko I.P., Hryhorenko M.S. (2024). Metod interpoliatsii dlia prohnozuvannia metryk vykorystannia khmarnykh obchyslen v statystychnomu navchanni [Interpolation method for predicting metrics of the use of cloud computing in statistical learning]. *Nauka i tekhnika sohodni*. no 4(32). pp. 1192-1205. Retrieved from <http://perspectives.pp.ua/index.php/nts/article/view/10943>.
2. Volontyr L.O., Zelinska O.V., Potapova N.A., Chikov I.A. (2020) Chyselni metody. Navchalnyi posibnyk [Numerical methods. Study guide]. Vinnytsia: VNAU. [in Ukrainian].
3. Potapova N.A. Ekonometrychnyi analiz prychnynno-naslidkovykh zviazkiv komponentiv struktury realizatsii zernovykh kultur v zbutovii ahrolohystytsi [Econometric analysis of causal-consequence links of the components of grain selling structure in sales agrilogistics]. *Formation of a market economy in Ukraine*. 2017. Vol. 38. S. 139-145.
4. Melnyk I.V., Pochynok A.V. (2020) Porivnialnyi analiz metodiv interpoliatsii ta aproksymatsii hranychnoi traiektorii korotkofokusnoho elektronnoho puchka za umovy yoho transportuvannia v ionizovanomu hazi [Comparative analyze of the methods of interpolation and approximation of the boundary trajectory of short-focus electron beam in conditions of its propagation in the ionized gas]. *Visnyk Universytetu «Ukraina». Seriya: informatyka, obchysliuvalna tekhnika ta kibernetyka*. no 1 (24). pp. 106-123.
5. Tolochko O.I., Palis Stefan, Burmelov O.O., Kaluhin D.V. (2021) Discrete approximation of continuous objects with Matlab. *Applied Aspects of Information Technology*. no 2. pp. 178-191.
6. Bakhrushyn V.Ie. (2011) Metody analizu danykh: navchalnyi posibnyk dlia studentiv [Methods of data analysis: a study guide for students.]. Zaporizhzhia: KPU. [in Ukrainian].
7. Kuzmyn V.M., Zaliskyi M.Iu., Klymchuk V.P. (2020) Pobudova matematychnykh modelei z vykorystanniam polisehmentnoi rehressii. Naukoiemni tekhnolohii [Mathematical models building with polysegmented regression usage]. no1(45). pp. 11-18.
8. Riabchii V.V., Trehub M.V. (2014) Aproksymatsiia funktsii serednikh kvadratnykh pokhybok ploshch zemelnykh dilianok dlia vyznachennia yikh dopustymykh znachen [Approximation of functions of root mean square errors of land parcels areas to determine their allowable value]. *Heodeziia, kartohrafiia i aerofotoznimannia*. vol. 79. pp. 54-67.
9. Ofitsiinyi sait Derzhavnoi sluzhby statystyky Ukrainy [Official website of the State Statistics Service of Ukraine]. Retrieved from <http://ukrstat.gov.ua/>
10. Statystychnyi zbirnyk «Tvarynnytstvo Ukrainy za 2013» (2014) [Statistical collection «Creatures of Ukraine for 2013»]. Kyiv: State Statistics Service of Ukraine.
11. Statystychnyi zbirnyk «Tvarynnytstvo Ukrainy za 2018» (2019) [Statistical collection «Creatures of Ukraine for 2018»]. Kyiv: State Statistics Service of Ukraine. (in Ukrainian).
12. Statystychnyi zbirnyk «Tvarynnytstvo Ukrainy za 2020» (2021). [Statistical collection «Creatures of Ukraine for 2020»]. Kyiv: State Statistics Service of Ukraine.

**М. О. СЛАБІНОГА**

кандидат технічних наук,  
доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
ORCID: 0000-0002-7296-0356

**Т. В. БОЙЧУК**

аспірант кафедри комп'ютерних систем і мереж  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
ORCID: 0009-0006-5058-4958

**Д. О. ФЕЩАК**

студент кафедри комп'ютерних систем і мереж  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
ORCID: 0009-0009-1536-4302

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПРИЙОМУ ТА ОПРАЦЮВАННЯ ЗАЯВОК ЗАСОБАМИ TELEGRAM-БОТА ТА ПРОГРАМНОГО ІНТЕРФЕЙСУ СИСТЕМИ OPENPROJECT

Стаття присвячена питанням автоматизації процесів технічної підтримки та впровадженню сучасних технологій для підвищення ефективності роботи таких систем. У дослідженні акцентується увага на важливості швидкого реагування на запити користувачів для забезпечення безперервної роботи IT-інфраструктури. Автори аналізують вплив сучасних рішень, таких як автоматизація процесів і застосування штучного інтелекту, на ефективність технічної підтримки та рівень задоволеності користувачів.

У статті розглядається система OpenProject, яка використовується для управління проектами та задачами в рамках технічної підтримки. В роботі детально описується API OpenProject, його функції та можливості інтеграції з іншими програмними рішеннями. API побудований на REST архітектурі та використовує стандартні HTTP методи, що дозволяє легко налаштовувати автоматизацію процесів, таких як створення, оновлення та управління проектами, завданнями, користувачами та файлами. Важлива увага приділяється безпеці, зокрема використанню API ключів та OAuth 2.0 для аутентифікації.

Однією з ключових тем статті є розробка телеграм-бота для автоматизації подачі заявок до відділу цифровізації та дистанційного навчання. Бот, створений на основі Python та бібліотек aiogram і ruopenproject, забезпечує інтеграцію з OpenProject для автоматичного створення та обробки заявок. У статті детально описується архітектура бота, його компоненти, зокрема інтерфейс користувача, бізнес-логіка, база даних та взаємодія з API Telegram.

Автори також наводять приклади різних типів заявок, які обробляються відділом цифровізації Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, включаючи адміністрування сайтів, управління інтернет-з'єднанням та технічною підтримкою обладнання. У статті описані функції бота, що дозволяють спростити ці процеси, зокрема реєстрацію заявок через Telegram і їх автоматичне додавання в систему OpenProject.

У статті висвітлюється практична цінність розробки, яка полягає в автоматизації рутинних процесів, зменшенні навантаження на працівників та підвищенні точності виконання заявок. Автори зазначають, що розробка є гнучкою та масштабованою, її можна адаптувати для інших підрозділів і організацій із подібними потребами в автоматизації технічної підтримки.

**Ключові слова:** технічна підтримка, система опрацювання заявок, програмний інтерфейс, чатбот, Telegram, OpenProject.

**М. О. SLABINOHА**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor at the Department of Computer Systems and Networks  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas  
ORCID: 0000-0002-7296-0356

**T. V. BOICHUK**

Postgraduate Student at the Department of Computer Systems and Networks  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas  
ORCID: 0009-0006-5058-4958

D. O. FESHCHAK

Student at the Department of Computer Systems and Networks  
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas  
ORCID: 0009-0009-1536-4302

## AUTOMATION OF TECHNICAL SUPPORT RECEIVING AND PROCESSING APPLICATION PROCESS USING TELEGRAM BOT AND OPENPROJECT API

*The article is devoted to issues of automation of technical support processes and introduction of modern technologies to improve the efficiency of such systems. The study emphasizes the importance of quick response to user requests to ensure continuous operation of the IT infrastructure. The authors analyze the impact of modern solutions, such as process automation and the use of artificial intelligence, on the effectiveness of technical support and the level of user satisfaction.*

*The article discusses the OpenProject system, which is used to manage projects and tasks within the framework of technical support. The work describes in detail the OpenProject API, its functions and the possibilities of integration with other software solutions. The API is built on the REST architecture and uses standard HTTP methods, which allows you to easily configure the automation of processes such as creating, updating and managing projects, tasks, users and files. Important attention is paid to security, in particular the use of API keys and OAuth 2.0 for authentication.*

*One of the key topics of the article is the development of a Telegram bot to automate the submission of applications to the digitization and distance learning department. Built on Python and the aiogram and pyopenproject libraries, the bot provides integration with OpenProject to automatically create and process requests. The article describes in detail the architecture of the bot, its components, including the user interface, business logic, database and interaction with the Telegram API.*

*The authors also provide examples of different types of applications that are processed by the digitalization department of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, including site administration, internet connection management, and equipment technical support. The article describes the functions of the bot, which allow you to simplify these processes, in particular, the registration of applications through Telegram and their automatic addition to the OpenProject system.*

*The article highlights the practical value of the development, which consists in automating routine processes, reducing the burden on employees and increasing the accuracy of application execution. The authors note that the development is flexible and scalable, and can be adapted for other departments and organizations with similar technical support automation needs.*

**Key words:** technical support, application processing system, software interface, chatbot, Telegram, OpenProject.

### Постановка проблеми

Ефективне опрацювання заявок технічною підтримкою дозволяє не тільки усунути технічні несправності, але й попередити їх появу в майбутньому. Завдяки цьому можна забезпечити стабільну роботу ІТ-інфраструктури, що є основою для досягнення стратегічних цілей організації. Важливим аспектом є також швидкість реагування на запити користувачів, адже затримка у вирішенні проблем може призвести до значних втрат для бізнесу. Окрім того, опрацювання заявок користувачів технічною підтримкою сприяє накопиченню знань та досвіду, що дозволяє вдосконалювати процеси обслуговування. Використання сучасних методів та технологій, таких як автоматизація процесів, бази знань та штучний інтелект, дозволяє значно підвищити ефективність роботи технічної підтримки.

Цифровізація закладів вищої освіти в Україні активно триває, і дедалі більше цифрових інструментів впроваджуються в навчальний та управлінський процес. У зв'язку з цим, зростає кількість заявок, пов'язаних із технічною підтримкою використання таких систем. Тому важливою задачею є автоматизація процесу прийому заявок для максимальної зручності користувача і оператора.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питанню автоматизації технічної підтримки присвячена значна кількість публікацій та технічних рішень і продуктів. Зокрема, в роботі [1] розглядається вплив COVID-19 на освітній процес, зокрема, на застосування інструментів онлайн-освіти та технічної підтримки, пов'язаної з ними. Робота [2] фокусується на розробці системи технічної підтримки з використанням бази знань. Автори роботи [3] звертають увагу на важливість задоволення технічною підтримкою клієнтів банківської сфери. Роботи [4-5] розглядають актуальне питання використання штучного інтелекту та генеративних мовних моделей у процесі автоматизації технічної підтримки.

### Формулювання мети дослідження

Метою роботи є розробка телеграм-бота як комунікаційного каналу між користувачами цифрових продуктів та системою OpenProject, що використовується технічною підтримкою відділу цифровізації та дистанційного навчання Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу для опрацювання заявок.

### Викладення основного матеріалу

OpenProject – це популярна система управління проектами з відкритим вихідним кодом, яка надає потужні інструменти для планування, відстеження прогресу та співпраці над проектами. Система широко використовується

в різних галузях для ефективного управління завданнями, ресурсами та термінами. Зокрема, вона забезпечує можливості для створення проєктів, керування завданнями, відстеження термінів виконання, а також інтеграцію з іншими інструментами та сервісами.

Однією з головних переваг OpenProject є її API (Application Programming Interface), який дозволяє інтегрувати систему з іншими програмними рішеннями та автоматизувати різноманітні процеси. API OpenProject [6] надає широкий набір функцій для взаємодії з даними системи, що дозволяє розробникам створювати кастомізовані рішення для своїх потреб. Використання API дає можливість розширювати функціональність системи, інтегрувати її з іншими інструментами та забезпечувати автоматизацію рутинних задач.

API OpenProject базується на REST (Representational State Transfer) архітектурі, що робить його зручним та інтуїтивно зрозумілим для використання. REST API використовує стандартні HTTP методи (GET, POST, PUT, DELETE), що забезпечує легку інтеграцію з будь-якими веб-додатками та сервісами. Кожен ресурс в API має унікальний URL, за допомогою якого можна отримувати доступ до необхідних даних або виконувати різноманітні операції з ними.

Основні ресурси, доступні через API OpenProject, включають:

- проєкти (Projects) – створення, отримання, оновлення та видалення проєктів. API дозволяє керувати усіма аспектами проєкту, включаючи його назву, опис, терміни виконання та відповідальних осіб;
- завдання (Work Packages) – створення, отримання, оновлення та видалення завдань, а також управління їхніми атрибутами (пріоритет, статус, відповідальний, терміни виконання тощо). Це дозволяє ефективно керувати роботою команди та забезпечувати виконання завдань у встановлені терміни;
- користувачі (Users) – управління користувачами системи, включаючи створення нових користувачів, оновлення інформації про них та призначення ролей. API забезпечує можливості для адміністрування користувачів та контролю їх доступу до різних ресурсів системи;
- коментарі (Comments) – додавання та отримання коментарів до завдань, що забезпечує ефективну комунікацію всередині команди. Це дозволяє користувачам обмінюватися інформацією, коментарями та рекомендаціями безпосередньо у системі;
- вкладення (Attachments) – управління файлами, прикріпленими до завдань або проєктів. API дозволяє завантажувати та отримувати файли, що додаються до завдань, забезпечуючи зручність у роботі з документацією та іншими ресурсами.

Для доступу до API необхідно використовувати аутентифікацію, яка може бути реалізована за допомогою API ключів або OAuth 2.0. Це забезпечує безпеку даних та обмежує доступ до них лише для авторизованих користувачів та додатків. Аутентифікація дозволяє контролювати, які дії можуть виконувати користувачі та додатки, що забезпечує захист конфіденційної інформації та запобігання несанкціонованому доступу.

API OpenProject також забезпечує можливість інтеграції з інструментами для комунікації та співпраці, такими як Slack, Microsoft Teams, Zoom тощо. Це дозволяє забезпечити ефективну комунікацію всередині команди та оперативний обмін інформацією про стан виконання завдань. Наприклад, за допомогою телеграм-бота можна автоматично надсилати повідомлення про нові завдання або зміни їхнього статусу до відповідних каналів в Slack або Microsoft Teams, що забезпечує своєчасне інформування команди та підвищує ефективність комунікації.

Одним із найпоширеніших способів автоматизованої комунікації є використання чатботів у різноманітних месенджерах. У зв'язку з тим, що за даними опитування здобувачів вищої освіти та науково-педагогічних працівників ІФНТУНГ, найбільш поширеним месенджером для комунікації є Telegram, було прийняте рішення розробити бота для подачі заявок до відділу цифровізації та дистанційного навчання щодо здійснення технічної підтримки.

Відділ цифровізації та дистанційного навчання включає в себе декілька підрозділів, а саме:

- центр дистанційного навчання;
- інформаційно-обчислювальний центр;
- сектор взаємодії з ЄДЕБО.

До основних заявок, що надходять від користувачів до відділу цифровізації, відносяться:

- технічне адміністрування сайту університету;
- технічне адміністрування сайтів наукових журналів університету;
- призначення відповідальних адміністраторів окремих розділів сайту;
- опрацювання вхідної кореспонденції, пов'язаної з цифровою інфраструктурою університету;
- виконання стратегії цифровізації університету.

До основних заявок, що надходять від користувачів до центру дистанційного навчання, відносяться:

- заявки на отримання доступу до сайту;
- заявки на створення електронних курсів;
- заявки на сертифікацію електронних курсів;
- заявки на встановлення спеціалізованих плагінів.

До основних заявок, що надходять від користувачів до інформаційно-обчислювального центру, відносяться:

- заявки на підключення інтернету;
- заявки на проблеми з інтернетом;
- заявки на ремонт комп'ютерної техніки;
- заявки на придбання комп'ютерної техніки;
- заявки на встановлення програмного забезпечення;
- заявки на встановлення іншого обладнання (принтери, проектори, тощо);

До основних заявок, що надходять від користувачів до сектору взаємодії з ЄДЕБО відносяться:

- заявки на додавання нового користувача ЄДЕБО;
- заявки на зміну відповідального користувача ЄДЕБО.

Основними компонентами для реалізації чат-бота [7-8] були вибрані мова програмування Python, бібліотеки aiogram та ruoreproject, Docker для контейнеризації, а також база даних PostgreSQL для збереження даних.

Telegram-бот включає наступні компоненти:

- інтерфейс користувача (UI) – включає в себе інтерактивні повідомлення, які бот відправляє текстові повідомлення користувачам з інформацією про товари, статус замовлень тощо. Кнопки для швидкого доступу до основних функцій, які полегшують взаємодію з ботом, наприклад, кнопки «Поломки», «Інша проблема», «Допомога»;
- бізнес-логіка – включає в себе обробку запитів користувачів, які бот приймає та обробляє текстові команди і повідомлення від користувачів, такі як /start, /help та основний список проблем. Логіка обробки заявок, який включає функції для подачі заявок, збереження їх у базі даних і обробку статусів заявок;
- база даних (БД) – Зберігання інформації про заявки та їхній статус;
- інтеграція з Telegram API – включає в себе взаємодія з серверами Telegram для обробки повідомлень та команд, під час яких бот використовує Telegram API для отримання повідомлень від користувачів, відправки відповідей і керування взаємодією з користувачами Telegram.

Архітектура Telegram-бота подана на рисунку 1.

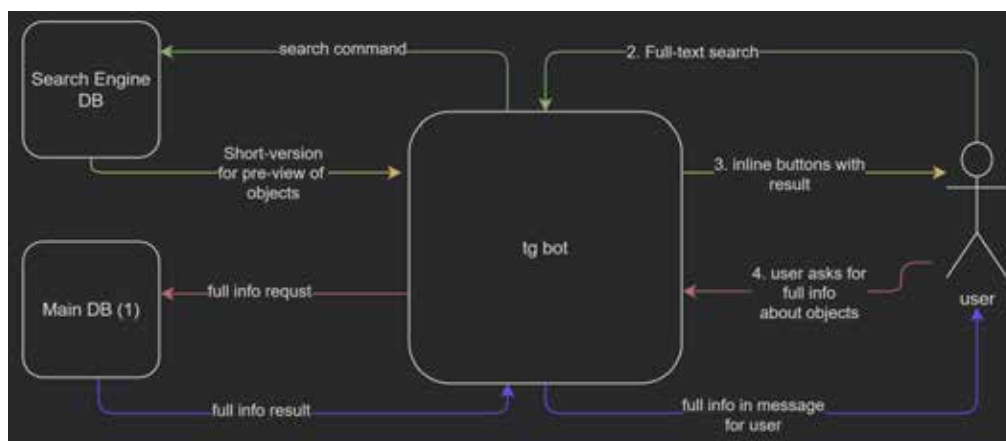


Рис. 1. Архітектура телеграм-бота

Файлова структура, представлена на рисунку 1, складається з декількох директорій та файлів, кожен з яких має свою функціональну роль у проєкті:

- директорія «database»: Відповідає за взаємодію з базою даних. Тут можуть зберігатися файли з моделями, скрипти для створення і оновлення таблиць, а також інші утиліти, пов'язані з базою даних;
- директорія «filters»: Містить файли, які визначають різні фільтри для повідомлень. Файл main.py ймовірно містить основну логіку для обробки фільтрів, а \_\_init\_\_.py робить можливим імпорт цього модуля;
- директорія «handlers» містить піддиректорії admin і user, які включають обробники для відповідних типів користувачів. Наприклад, main.py та other.py можуть містити функції для обробки команд та повідомлень від користувачів;
- Директорія «keyboards» включає файли для створення та управління клавіатурами бота. Наприклад, inline.py для інлайн-клавіатур, reply.py для клавіатур з відповідями;
- Директорія «misc»: Зберігає різні допоміжні скрипти і конфігураційні файли, такі як env.py для налаштувань середовища, util.py для утиліт;
- файл «entrypoint.sh»: Скрипт для запуску додатка в середовищі Docker.
- файл «run.py»: Основний файл для запуску бота.
- файл «.env.dev»: Файл для зберігання конфігурацій середовища під час розробки.



- `docker-compose.yml`: Файл конфігурації Docker Compose для визначення сервісів, мереж і томів для Docker-контейнерів.
  - `Dockerfile`: Файл конфігурації для створення Docker-образу.
  - `requirements.txt`: Файл, що містить список залежностей Python, необхідних для проекту.
- Приклад діалогового вікна розробленого телеграм-бота подано на рисунку 2.

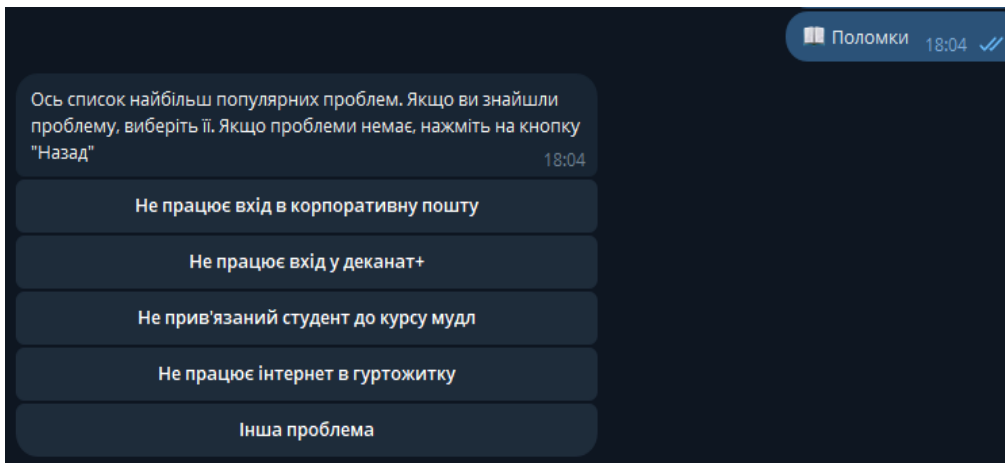


Рис. 2. Приклад взаємодії із телеграм-ботом

При виборі одного з пунктів, на екран виводиться текст про реєстрацію проблеми, а заявка з відповідним Telegram ID користувача передається у систему OpenProject. Приклад створеної заявки в OpenProject подано на рисунку 3.

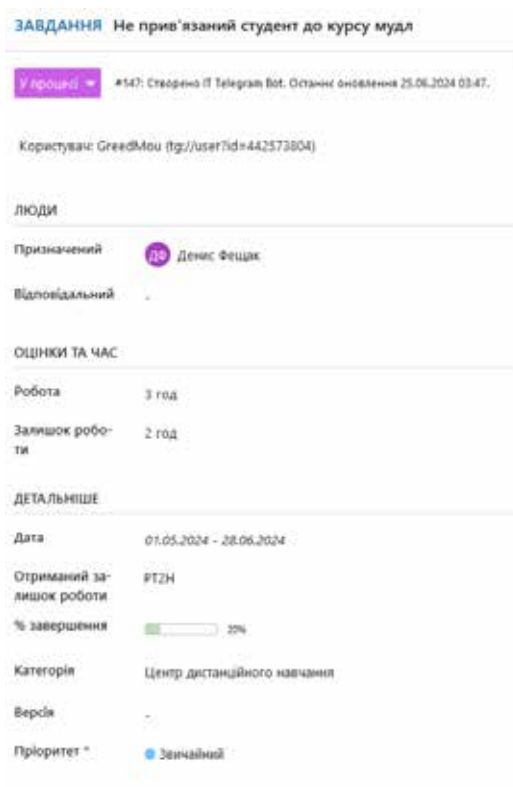


Рис. 3. Приклад взаємодії із телеграм-ботом

Таким чином, заявка потрапляє в систему технічної підтримки для подальшого опрацювання працівниками відділу цифровізації та дистанційного навчання.

### Висновки

Практична цінність даної розробки полягає в декількох аспектах. По-перше, розробка телеграм-бота дозволяє значно підвищити ефективність роботи технічної підтримки, зменшуючи час на опрацювання заявок. По-друге, автоматизація процесів сприяє зниженню навантаження на персонал та зменшенню кількості помилок. По-третє, це покращує рівень задоволеності користувачів, що позитивно впливає на імідж організації.

Розроблений телеграм-бот може бути масштабований на інші підрозділи, які мають схожі потреби в автоматизації процесів технічної підтримки. Гнучкість і масштабованість рішення дозволяють легко адаптувати його до конкретних вимог будь-якої організації.

**Подяка.** Автори хочуть подякувати Збройним Силам України та всім захисникам України за можливість продовжувати наукову та технічну діяльність під час війни.

### Список використаної літератури

1. Bao, Wei. (2020). COVID-19 and online teaching in higher education: A case study of Peking University. *Human Behavior and Emerging Technologies*. 2. 10.1002/hbe2.191.
2. Wicaksono, F., & Baswara, O. S. (2020). Design and Implementation of Web-Based Helpdesk Information Systems Using Extreme Programming Methods. *ITEJ (Information Technology Engineering Journals)*, 5(2), 88–96. <https://doi.org/10.24235/itej.v5i2.44>
3. Li, F., Lu, H., Hou, M., Cui, K., & Darbandi, M. (2021). Customer satisfaction with bank services: The role of cloud services, security, e-learning and service quality. In *Technology in Society* (Vol. 64, p. 101487). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101487>
4. Al-Hawari, F., & Barham, H. (2021). A machine learning based help desk system for IT service management. In *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences* (Vol. 33, Issue 6, pp. 702–718). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2019.04.001>
5. Haleem, A., Javaid, M., & Singh, R. P. (2022). An era of ChatGPT as a significant futuristic support tool: A study on features, abilities, and challenges. In *BenchCouncil Transactions on Benchmarks, Standards and Evaluations* (Vol. 2, Issue 4, p. 100089). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.tbench.2023.100089>
6. OpenProject API // [Електронний ресурс]. URL:<https://www.openproject.org/docs/api/> (дата звернення: 01.05.2024)
7. Офіційний сайт Telegram API // [Електронний ресурс]: URL: <https://core.telegram.org/api>. (Дата звернення: 01.05.2024)
8. Medium // [Електронний ресурс]: URL: <https://servat.medium.com/creating-a-telegram-bot-with-python-4a3b4906c101> (Дата звернення: 02.05.2024)

### References

1. Bao, Wei. (2020). COVID-19 and online teaching in higher education: A case study of Peking University. *Human Behavior and Emerging Technologies*. 2. 10.1002/hbe2.191.
2. Wicaksono, F., & Baswara, O. S. (2020). Design and Implementation of Web-Based Helpdesk Information Systems Using Extreme Programming Methods. *ITEJ (Information Technology Engineering Journals)*, 5(2), 88–96. <https://doi.org/10.24235/itej.v5i2.44>
3. Li, F., Lu, H., Hou, M., Cui, K., & Darbandi, M. (2021). Customer satisfaction with bank services: The role of cloud services, security, e-learning and service quality. In *Technology in Society* (Vol. 64, p. 101487). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2020.101487>
4. Al-Hawari, F., & Barham, H. (2021). A machine learning based help desk system for IT service management. In *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences* (Vol. 33, Issue 6, pp. 702–718). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2019.04.001>
5. Haleem, A., Javaid, M., & Singh, R. P. (2022). An era of ChatGPT as a significant futuristic support tool: A study on features, abilities, and challenges. In *BenchCouncil Transactions on Benchmarks, Standards and Evaluations* (Vol. 2, Issue 4, p. 100089). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.tbench.2023.100089>
6. *API documentation*. OpenProject.org. (01.05.2024). <https://www.openproject.org/docs/api/>
7. *Telegram apis*. Telegram APIs. (01.05.2024). <https://core.telegram.org/api>
8. Servat, A. (2024, February 18). *Creating a telegram bot with python*. Medium. <https://servat.medium.com/creating-a-telegram-bot-with-python-4a3b4906c101>

**В. М. ТКАЧОВ**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри електронних обчислювальних машин  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0000-0002-6524-9937

**І. С. ЧЕПУРНА**

асистент кафедри електронних обчислювальних машин  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0009-0008-2442-6221

**Т. Г. ФЕСЕНКО**

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри електронних обчислювальних машин  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
ORCID: 0000-0001-9636-9598

## МЕТОД МУЛЬТИРІВНЕВОГО VPN-ТУНЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВІДДАЛЕНОГО ДОСТУПУ ДО ВУЗЛІВ ЕКСТРАНЕТ-МЕРЕЖІ

У статті запропоновано новий метод мультирівневого VPN-тунелювання. Метод спрямований на забезпечення безпечного та контрольованого віддаленого доступу до вузлів екстранет-мережі корпоративного рівня. Метод дозволяє створити багаторівневу архітектуру тунелювання, що забезпечує різні рівні доступу для користувачів, залежно від їхньої ролі та привілеїв у корпоративній системі. Це дозволяє значно підвищити загальний рівень безпеки мережної інфраструктури, зокрема у випадках роботи з конфіденційними або критично важливими даними. Використання кількох послідовних VPN-тунелів на різних рівнях мережі створює додаткові шари захисту, що забезпечують надійність передачі даних і захист від різноманітних кібератак, спрямованих на компрометацію окремих вузлів або каналів зв'язку. У статті також детально розглядаються технічні аспекти впровадження та реалізації багаторівневого VPN-тунелювання. Представлено детальні рекомендації щодо налаштування VPN-шлюзів на платформі Proxmoх, вибору протоколів шифрування та використання засобів автентифікації для кожного рівня. Крім того, особливу увагу приділено питанням оптимізації роботи VPN-тунелів з метою мінімізації затримок у передачі даних і підвищення ефективності використання мережевих ресурсів. Це дозволяє забезпечити більш стабільне та швидке з'єднання для користувачів, зменшивши вплив на продуктивність мережі. Гнучке розмежування прав доступу користувачів до різних сегментів мережі значно підвищує безпеку та зменшує ризики несанкціонованого доступу. Експериментальне дослідження ефективності роботи реалізації запропонованого методу проводилося за допомогою імітування екстранет-мережі на базі сегменту локальної комп'ютерної мережі кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки та підтвердило його ефективність у забезпеченні безперервного та захищеного доступу до екстранет-ресурсів, що підкреслює доцільність його використання в сучасних корпоративних середовищах.

**Ключові слова:** метод, VPN, екстранет-мережа, віддалений доступ.

**V. M. TKACHOV**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Electronic Computers  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
ORCID: 0000-0002-6524-9937

**I. S. CHEPURNA**

Assistant at the Department of Electronic Computers  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
ORCID: 0009-0008-2442-6221

**T. G. FESENKO**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Professor at the Department of Electronic Computers  
Kharkiv National University of Radio Electronics  
ORCID: 0000-0001-9636-9598

## MULTI-LEVEL VPN-TUNNELING METHOD FOR ENSURING REMOTE ACCESS TO EXTRANET NETWORK NODES

*This article proposes a new method of multilevel VPN tunneling. The method is aimed at ensuring secure and controlled remote access to corporate-level extranet network nodes. It allows the creation of a multilevel tunneling architecture, providing different levels of access for users depending on their roles and privileges within the corporate system. This approach significantly enhances the overall security of the network infrastructure, especially when handling confidential or critical data. The use of multiple consecutive VPN tunnels at various network levels adds additional layers of protection, ensuring reliable data transmission and defense against various cyberattacks targeting the compromise of specific nodes or communication channels. The article also provides a detailed examination of the technical aspects of the implementation and deployment of multilevel VPN tunneling. Detailed recommendations are presented for configuring VPN gateways on the Proxmox platform, choosing encryption protocols, and utilizing authentication tools at each level. Moreover, particular attention is given to optimizing the operation of VPN tunnels to minimize data transmission delays and improve the efficiency of network resource usage. This ensures more stable and faster connections for users while reducing the impact on network performance. Flexible user access control to different network segments significantly enhances security and reduces the risks of unauthorized access. Experimental research on the effectiveness of the proposed method was conducted by simulating an extranet network based on the local area network segment of the Department of Electronic Computers at Kharkiv National University of Radio Electronics. The results confirmed the method's effectiveness in providing uninterrupted and secure access to extranet resources, highlighting its suitability for use in modern corporate environments.*

**Key words:** method, VPN, extranet network, remote access.

### Постановка проблеми

Інформаційне суспільство XXI сторіччя усе більше залежить від інноваційних інформаційних технологій, що дозволяють організаціям забезпечувати роботу своїх працівників у будь-якому місці, де є доступ до глобальної мережі Інтернет [1-5]. Політика захисту корпоративних даних стала причиною появи таких сегментів глобальної мережі як корпоративні комп'ютерні мережі, які в свою чергу класифікуються як екстранет- та інтранет-мережі [6]. Однак, разом з цим виникає низка проблем технічного характеру, пов'язаних із забезпеченням безпечного та стабільного доступу до корпоративних ресурсів, особливо, через екстранет-мережі. Одним з ключових рішень для реалізації віддаленого доступу є використання VPN-технологій. Однак, традиційні VPN-рішення мають обмеження, а деякі протоколи вважаються такими як ненадійними [7]. Найуживаніші протоколи тунелювання мають нижчу продуктивність через складні процеси шифрування та розшифрування даних, високі вимоги до обчислювальних ресурсів тощо.

У контексті багаторівневого VPN-тунелювання проблема стає ще більш складною. Це пов'язано з тим, що потрібно забезпечити надійну автентифікацію користувачів на кількох рівнях тунелювання для додаткового захисту даних, при цьому необхідно підтримувати достатню швидкість передачі даних для ефективної роботи додатків користувачів для підключення до віддалених робочих станцій. Важливо також враховувати, що, наприклад, для малого бізнесу існує обмежений бюджет на придбання й утримання мережної інфраструктури, що робить необхідним пошук рішень, які не потребують значних витрат на обладнання або використання технологій віртуалізації у хмарах тощо.

Таким чином, однією з головних технічних проблем є організація безпечного віддаленого доступу до вузлів екстранет-мережі в умовах обмежених ресурсів, коли потрібно досягти максимального рівня захищеності без суттєвого збільшення навантаження на мережну інфраструктуру. Віддалені користувачі повинні мати можливість безпечно підключатися до корпоративних ресурсів через загальнодоступні (небезпечні) сегменти мережі Інтернет, при цьому мінімізуючи ризики витоку даних та збереження цілісності переданої інформації.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Точкові дослідження в галузі віртуальних комп'ютерних мереж зосереджені на вирішенні ряду проблем, зокрема, пов'язаних з ефективністю та надійністю VPN-технологій для забезпечення безпечного доступу до корпоративних мереж [8-15]. Однак швидкість роботи технічної системи та вимоги до ресурсів залишаються важливими проблемами, які потребують нових підходів. Відповідно, було виконано огляд останніх досліджень і публікацій, присвячених цим питанням, з метою аналізу існуючих підходів у вирішенні проблем VPN-тунелювання, зазначених при постановці проблематики досліджень.

Так, у роботі [8] авторами проаналізована проблематика продуктивності та оптимізації VPN-рішень. Автори зазначають, що використання стандартних VPN-протоколів, таких як IPsec та OpenVPN, забезпечує високий рівень захисту, але це часто відбувається за рахунок зниження швидкості передачі даних через складність процесів шифрування та розшифрування. Подібну проблему розглянуто у роботі [9], зокрема, авторами досліджено продуктивність VPN при одночасному підключенні великої кількості користувачів до корпоративної мережі. Вони рекомендують оптимізацію роботи тунелів через використання протоколу UDP

замість TCP, що забезпечує менші затримки, але вимагає додаткових налаштувань для підтримки стабільності з'єднання.

У роботі [10] автори підтверджують важливість вибору певних мережних протоколів для зменшення впливу на продуктивність системи. Наприклад, OpenVPN, один з найбільш популярних і надійних VPN-рішень, підтримує гнучкі методи автентифікації та захисту, але потребує достатньої кількості ресурсів для обслуговування великих потоків даних. Цей протокол демонструє задовільні результати при роботі з невеликими та середніми корпоративними мережами у відношенні до кількості віддалених користувачів та інтенсивності мережного трафіку, однак його використання в умовах великої кількості підключень вимагає оптимізації серверних налаштувань та відповідної конфігурації мережної інфраструктури.

В останні роки було проведено багато досліджень щодо удосконалення методів автентифікації користувачів та шифрування даних. Так у роботі [11] наведено результати дослідження деяких алгоритмів шифрування, які використовуються в VPN-рішеннях, включаючи AES та SSL/TLS. Автор відзначив, що оптимальним підходом є використання двосторонньої автентифікації сертифікатів, яка забезпечує високий рівень захисту від несанкціонованого доступу.

Також важливе місце в наукових дослідженнях посідає питання динамічної маршрутизації IP-адрес та контролю доступу користувачів [12]. Робота OpenVPN з використанням протоколу SSL/TLS дозволяє інтегрувати політики контролю доступу на рівні груп користувачів, що значно знижує ризик несанкціонованого доступу до ресурсів корпоративної мережі. В роботі [12] детально описано можливості комерційних VPN-сервісів для захисту корпоративних мереж, де основний акцент зроблено на простоту у використанні та надійність шифрування даних.

Останніми роками дослідники та практики почали активно застосовувати технології віртуалізації для підвищення ефективності використання VPN-рішень. Програмні платформи на основі контейнерів, такі як Proxmox, дозволяють розгорнути VPN-сервери в ізольованих середовищах, що підвищує рівень безпеки та спрощує адміністрування мережі. Так, у роботі [13] описано переваги використання контейнерів для віртуалізації, оскільки це дозволяє уникати надмірного використання ресурсів фізичних серверів і спрощує процес налаштування VPN-тунелів.

Proxmox, зокрема, пропонує вбудовані інструменти для управління мережними ресурсами, включаючи класифікацію серверів та оперативну міграцію віртуальних машин [13]. Це дозволяє масштабувати мережну інфраструктуру без необхідності інвестувати в нове обладнання, що є критичним для малого та середнього бізнесу. Крім того, Proxmox підтримує інтеграцію з OpenVPN, що робить можливим розгортання багаторівневих VPN-тунелів для безпечного доступу до ресурсів екстранет-мереж.

Поряд з традиційними рішеннями для VPN, популярність набирають хмарні VPN-сервіси, які надають можливість швидкого розгортання та масштабування мережевої інфраструктури. У роботі [14] описується, як хмарні рішення дозволяють бізнесу ефективно забезпечувати віддалений доступ до корпоративних ресурсів без необхідності підтримувати власну інфраструктуру. Проте, як зазначають автори, такі рішення часто стають менш контрольованими з точки зору безпеки, що може створювати додаткові ризики, особливо для великих компаній.

Пандемія COVID-19 та пов'язані з нею локдауни, повномасштабне вторгнення РФ в Україну – різко збільшили попит на рішення для віддаленого доступу, що призвело до активного впровадження VPN у всіх сферах українського бізнесу. Так, у роботі [15] авторами зазначається, що український бізнес зіткнувся з необхідністю швидко адаптувати свою інфраструктуру для підтримки зростаючого навантаження віддалених підключень в умовах релокацій. Ця тенденція також призвела до підвищеного інтересу до віртуалізації та контейнерних рішень, таких як Proxmox, які забезпечують гнучкість та безпеку в умовах швидкої адаптації до нових викликів.

Таким чином, аналіз останніх досліджень і публікацій [8-15] показує, що ефективність VPN-рішень залежить від низки факторів, включаючи вибір протоколів шифрування, методів автентифікації та використання технологій віртуалізації. Технології на базі контейнерів, такі як Proxmox, у поєднанні з OpenVPN, демонструють великий потенціал для впровадження багаторівневих VPN-тунелів, що дозволяє забезпечити безпечний та ефективний віддалений доступ до вузлів екстранет-мережі, що, в свою чергу, забезпечує сталий розвиток бізнесу.

#### **Формулювання мети дослідження**

Метою дослідження є розробка та впровадження методу мультирівневого VPN-тунелювання для забезпечення безпечного віддаленого доступу до вузлів корпоративної екстранет-мережі, що дозволяє підвищити рівень захищеності даних, зменшити вразливість до несанкціонованого доступу та забезпечити надійне функціонування екстранет-мережі в умовах обмеженого ресурсного забезпечення.

#### **Викладення основного матеріалу дослідження**

##### **Алгоритмічне забезпечення**

Метод багаторівневого VPN-тунелювання для забезпечення віддаленого доступу до вузлів екстранет-мережі базується на інтеграції сучасних технологій шифрування, автентифікації та динамічного управління мережевими ресурсами. Новизна цього підходу полягає у тому, що має місце розвиток підходів багаторівневої архітектури

віртуальних мережних тунелів, що забезпечує диференційовані рівні доступу до різних ресурсів корпоративної мережі, підвищуючи як їх продуктивність, так і безпеку.

Метод багаторівневого VPN-тунелювання, який пропонується, включає в себе кілька послідовних кроків, які в свою чергу можуть мати різні сценарії виконання, в залежності від умов застосування даного методу. Отже:

Крок 1. Попередня аутентифікація та авторизація користувача. До встановлення VPN-з'єднання проводиться попередня перевірка користувача через інтерфейс аутентифікації за сертифікатами або іншими механізмами автентифікації (наприклад, двофакторна автентифікація). Цей крок є критично важливим для попередження доступу неавторизованих користувачів і дозволяє задати умови для наступних рівнів тунелювання. Якщо автентифікація не вдається, система автоматично відхиляє запит на з'єднання і крок може бути повтореним як користувачем, так і певною автоматизованою системою.

Крок 2. Створення першого рівня тунелювання. Перший тунель призначений для шифрування базового інтернет-трафіку користувача з мінімальними вимогами до ресурсів. Він забезпечує початковий рівень захисту та автентифікації на рівні VPN. Трафік може шифруватися за допомогою AES-256 або TLS/SSL, залежно від вибору протоколу. У разі успішної автентифікації на першому рівні користувач отримує доступ до внутрішніх ресурсів загального призначення, але доступ до критично важливих вузлів корпоративної мережі залишається обмеженим.

Крок 3. Налаштування внутрішньої маршрутизації та моніторингу трафіку. Після успішного з'єднання на першому рівні корпоративна мережа, яка функціонує з використанням даного методу, здійснює динамічний моніторинг трафіку. Вона аналізує типи запитів і класифікує їх відповідно до рівня доступу, який необхідний для виконання операцій. У разі виявлення підозрілого трафіку або незвичних патернів поведінки (наприклад, несанкціонованих запитів на доступ до критичних ресурсів) відповідні прикордонні вузли мережі можуть автоматично ініціювати обмеження або додаткову автентифікацію.

Крок 4. Створення другого рівня тунелювання. Другий рівень VPN-тунелювання забезпечує підвищену безпеку для користувачів, яким необхідний доступ до конфіденційних ресурсів внутрішньої мережі або екстранет-вузлів. Цей рівень включає додаткові процедури автентифікації, такі як одноразові паролі або цифрові підписи. Дані передаються через VPN-тунель із покращеними методами шифрування (наприклад, більш складні варіанти протоколів TLS із сертифікованими ключами). Якщо автентифікація не вдається, відповідний прикордонний вузол автоматично закриває другий рівень і обмежує доступ до основного рівня тунелювання.

Крок 5. Налаштування динамічного управління ресурсами. Корпоративна мережа використовує інтелектуальні алгоритми динамічного управління ресурсами на основі навантаження, активності користувачів і типу запитів. Наприклад, якщо обсяг трафіку або кількість підключених користувачів до другого рівня значно збільшується, прикордонні вузли можуть тимчасово призупинити прийняття нових підключень або перемикає запити на інші ресурси для забезпечення стабільності роботи корпоративної мережі.

Крок 6. Створення нового рівня тунелювання. Новий рівень VPN-тунелювання розрахований на спеціалізовані запити, що вимагають максимального рівня безпеки (наприклад, доступ до критично важливих серверів або баз даних). Для цього рівня використовується багаторівнева автентифікація з застосуванням апаратних токенів, а також посилені алгоритми шифрування даних (наприклад, алгоритми шифрування з довгими ключами або квантові механізми шифрування). Доступ на цьому рівні дозволяється лише після підтвердження додаткових прав доступу.

Крок 7. Закриття тунелів та завершення сесії. Після завершення роботи всі тунелі автоматично закриваються. Корпоративна мережа здійснює моніторинг залишкових даних і гарантує, що всі тимчасові ключі шифрування видаляються після завершення сесії. Це забезпечує відсутність можливості перехоплення або повторного використання ключів для несанкціонованого доступу в майбутньому.

Запропонований метод доцільно використовувати при наступних умовах:

– початковий рівень забезпечує загальне підключення користувачів та контроль за автентичністю. Основна умова – надання доступу лише авторизованим користувачам, що проходять першу автентифікацію. У разі збоїв або помилок з'єднання, тунель одразу закривається;

– другий рівень працює лише для користувачів, яким необхідний доступ до більш конфіденційних даних. Система застосовує механізми моніторингу активності для виявлення підозрілих дій. Якщо виявляються порушення, доступ блокується або переводиться в режим обмеженої доступності;

– більш глибокі рівні орієнтовані на спеціальні операції та ресурси. Умови доступу суворіші, а вимоги до автентифікації жорсткіші. Тунель працює лише при виконанні всіх умов перевірки.

Псевдокод, наведений нижче, дозволяє більш точно описати логіку виконання методу. У ньому зазначені конкретні умови, цикли, виклики функцій та обробку даних, що важливо для розуміння послідовності операцій у методі.

```

# 1. Ініціація підключення клієнта
client_initiates_connection()
# 2. Створення першого тунелю
vpn_tunnel_1 = establish_vpn_tunnel(server_address_1, encryption="AES-256")
if not authenticate_user(vpn_tunnel_1, user_certificate):
    terminate_connection()
    exit()
# 3. Створення другого тунелю для доступу до внутрішніх вузлів
vpn_tunnel_2 = establish_vpn_tunnel(server_address_2, encryption="AES-256")
if not authenticate_user(vpn_tunnel_2, user_certificate):
    terminate_connection()
    exit()
# 4. Опціональний третій тунель для спеціалізованих ресурсів
if needs_specialized_access():
    vpn_tunnel_3 = establish_vpn_tunnel(server_address_3, encryption="AES-256")
    if not authenticate_user(vpn_tunnel_3, user_certificate):
        terminate_connection()
        exit()
# 5. Виконання запитів користувача через відповідний тунель
access_resources(vpn_tunnel_2 or vpn_tunnel_3)
# 6. Завершення сесії
terminate_vpn_tunnels([vpn_tunnel_1, vpn_tunnel_2, vpn_tunnel_3])
terminate_connection()

```

#### Лістинг 1. Псевдокод запропонованого методу

##### Оцінка ефективності розробленого методу

Загальна ефективність методу багаторівневого VPN-тунелювання може бути визначена через зважену оптимізацію всіх факторів: швидкості передачі, рівня безпеки та ефективності використання ресурсів. Вона може бути виражена через наступну багатофакторну оптимізаційну задачу:

$$E_{total} = \max(\alpha \cdot S + \beta \cdot (1 - P_{total} \cdot \log(C_{attack})) + \gamma \cdot R_{eff}) \quad \text{при} \quad C_{attack} = \min(C_{attack,i}) \quad (1)$$

де  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – вагові коефіцієнти, які визначають пріоритети між швидкістю передачі даних, рівнем безпеки та ефективністю ресурсів;

$C_{attack}$  – мінімальна обчислювальна складність атаки на рівні шифрування.

Компоненти оптимізаційної задачі (1) представлені нижче:

1. Оцінка продуктивності передачі даних у тунелях з урахуванням криптографічної складності. Швидкість передачі даних ( $S$ ) може бути зменшена через обчислювальну складність алгоритмів шифрування на кожному рівні тунелювання. Нехай  $C_{comp,i}$  – обчислювальна складність шифрування на  $i$ -му рівні, тоді ефективна швидкість передачі даних може бути представлена як:

$$S = \frac{B}{N \sum_{i=1}^N \left( C_{comp,i} + \frac{t_{enc,i}}{t_{trans,i}} \right)}, \quad (2)$$

де  $B$  – базова швидкість мережі без шифрування, Б/с;

$N$  – кількість рівнів тунелювання, од.;

$t_{enc,i}$  – час, необхідний для шифрування на  $i$ -му рівні, с;

$t_{trans,i}$  – час передачі даних через мережу на  $i$ -му рівні, с.

Обчислювальна складність залежить від використовуваного алгоритму шифрування (наприклад, AES-256), і співвідношення між часом шифрування та передачею даних на визначених рівнях.

2. Оцінка затримки передачі даних з урахуванням перемикання рівнів. Затримка ( $L$ ) повинна враховувати не тільки час шифрування і декодування, але й затримку через чергування (черги запитів) на кожному рівні тунелювання. Для цього можна застосувати модель чергування  $M/M/1$  [16] (середня затримка в системі з обслуговуванням):

$$L = \sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{\mu_i - \lambda_i} + t_{enc,i} + t_{dec,i} + t_{trans,i} \right), \quad (3)$$

де  $\mu_i$  – середня швидкість обробки запитів на  $i$ -му рівні;  
 $\lambda_i$  – інтенсивність вхідних запитів, середня кількість запитів на одиницю часу;  
 $t_{dec,i}$  – час, необхідний для декодування даних на  $i$ -му рівні, с.

Дана формула (3) дозволяє моделювати вплив навантаження на систему та враховувати затримку через черги при підвищеному навантаженні на мережу.

3. Оцінка ефективності використання ресурсів із врахуванням заходів оптимізації. Ефективність використання ресурсів залежить від того, чи оптимально використовуються обчислювальні ресурси для шифрування та передачі даних. Це можна представити у такому вигляді:

$$R_{effect} = \frac{\sum_{j=1}^M D_j}{\sum_{i=1}^N (C_{enc,i} + C_{trans,i}) \times \max\left(\frac{t_{enc,i}}{t_{trans,i}}, 1\right)}, \quad (4)$$

де  $D_j$  – обсяг даних, переданий на  $j$ -му рівні, Б (відноситься до завдань передачі даних);  
 $C_{enc,i}$  – обчислювальні ресурси, витрачені на шифрування на  $i$ -му рівні, од.;  
 $C_{trans,i}$  – обчислювальні ресурси, витрачені на передачу на  $i$ -му рівні, од.;  
 $M$  – кількість завдань на передачу даних.

4. Оцінка рівня безпеки через ймовірність складної атаки. Для оцінки рівня безпеки доцільно використати ймовірнісну модель, яка враховує не тільки ймовірність успішної атаки на кожен рівень, але й обчислювальну складність атаки на шифрування:

$$P_{total} = 1 - \prod_{i=1}^N \left(1 - \frac{P_{attack,i}}{C_{attack,i}}\right), \quad (5)$$

де  $P_{attack,i}$  – ймовірність успішної атаки на  $i$ -му рівні;  
 $C_{attack,i}$  – обчислювальна складність успішної атаки на шифрування на  $i$ -му рівні.

З (5) видно, що чим складніше алгоритм шифрування, тим менша ймовірність успішної атаки.

Даний підхід дозволяє комплексно оцінити ефективність методу багаторівневого VPN-тунелювання з врахуванням складності криптографічних алгоритмів, моделі чергування, ресурсоемності шифрування та передачі даних, а також ймовірності успішних атак. Ці моделі забезпечують більш точну кількісну оцінку взаємозв'язку між рівнем безпеки, швидкістю передачі та ефективністю використання ресурсів, що важливо для оптимізації системи VPN.

#### Постановка експерименту

На початковому етапі було виконано аналіз апаратних вимог. Він показав, що для продуктивної роботи OpenVPN можна використовувати процесор з щонайменше з 4 ядрами та максимальною частотою 2,9 ГГц. Об'єм ОЗУ залежить від кількості підключених пристроїв та потоку даних. З практичної точки зору 1 ГБ ОЗУ дозволяє ефективно обслуговувати до 150 пристроїв, які підключені до VPN-сервера, причому конфігурація серверної частини VPN-серверу вказує на можливість підключення до 100 клієнтів. За таким розрахунком, таке рішення можуть дозволити невеликі та середні компанії з урахуванням використання інших пристроїв, які входять до корпоративної мережі. Пропускна здатність каналу зв'язку складає 72 Мбіт/с, що цілком достатньо для обслуговування користувачів експериментальної корпоративної мережі. Жорсткий диск VPN-сервера повинен мати не менше 8 ГБ вільного місця.

В рамках експерименту реалізовано всі функції VPN-серверу та передбачені дії користувачів системи. Так, щоб підключитися до екстранет-мережі, віддалений користувач повинен спочатку встановити клієнтську програму, за допомогою якої здійснюється віддалене підключення до VPN-сервера корпоративної мережі.

Налаштування VPN-сервер виконується безпосередньо у контейнері Proxmox, тоді як надання клієнтських сформованих сертифікатів здійснюється за допомогою веб-інтерфейсу OpenVPN GUI. Розташування VPN-серверу у такий спосіб надає додатковий захист віддаленого підключення та уникає можливості виявлення адреси серверу при можливих атаках зловмисників. До непривілейованого контейнеру Proxmox також неможливо підключитися за SSH безпосередньо. Для можливості передавати будь-які дані з контейнеру необхідно додатково налаштувати гостьову файловою системою. У такий спосіб виникає загроза витоку даних та несанкціонованого доступу до інформації локальної мережі, саме тому було обрано підключення веб-інтерфейсу OpenVPN GUI для керування групами користувачів, які будуть мати доступ до локальної мережі. На рисунку 1 представлено схему підключення користувачів до VPN-серверу.

Щоб підключитися до корпоративної мережі, віддалений користувач повинен спочатку встановити клієнтську програму VPN, яка використовується для підключення до VPN-сервера корпоративної мережі. Після успішного підключення користувач бачить сегмент корпоративної мережі.



На рисунку 2 можна побачити, що віддалений користувач підключається до VPN-серверу з мережі Інтернету через шлюз контейнеру Proxmox (шлюз від WAN до LAN). Тут він отримує ідентифікатор користувача з описаними правами доступу. Потім він може отримати доступ до екстранет-мережі та використовувати послуги, які ця мережа надає та дозволяє йому використовувати.

Захист системних даних здійснюється за AES-256 – протоколом шифрування даних. Використовується двосторонній сертифікат автентифікації, який вимагає від клієнта автентифікації сертифіката сервера, а від сервера – сертифіката клієнта, що забезпечує взаємну довіру.



Рис. 1. Схема підключення клієнтів до VPN-серверу

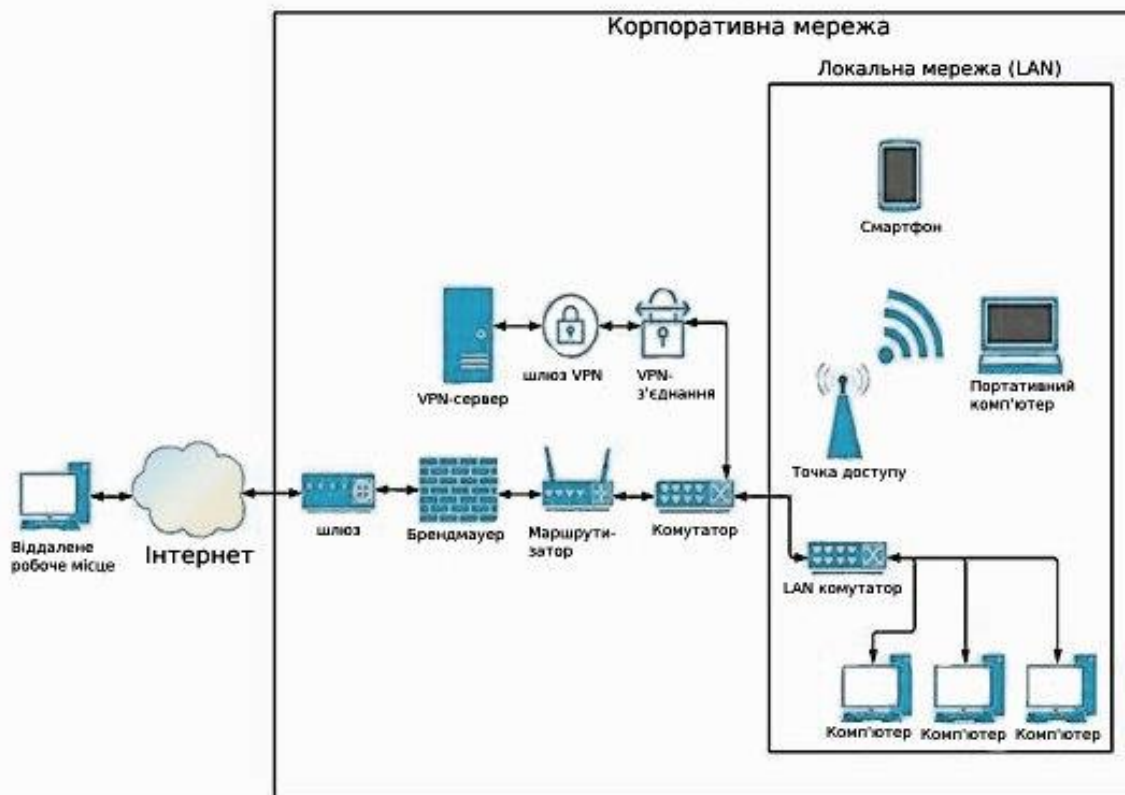


Рис. 2. Використання контейнеризації при реалізації методу

Використовуючи сервіси хмарних обчислень, розроблено та підготовлено модель тестування віртуальної системи. Комп'ютерна мережа та її функції були змодельовані за допомогою Linux Ubuntu Server версії 18.04, а клієнт – за допомогою Windows 10. Брандмауер налаштовується за допомогою Linux Ubuntu Server версії 18.04, а клієнт – за допомогою Windows 10. Брандмауер налаштовується за допомогою нескладних правил, в які додаються правила прокидання портів та відкриття портів 943 – для з'єднання з OpenVPN GUI, 1194 – стандартним портом OpenVPN, а також портами, які обирає та встановлює адміністратор мережі для додаткового захисту мережі. При установці пакетів OpenVPN завантажуються сертифікати та конфігураційні файли, що забезпечують безпеку підключення. В OpenVPN GUI після виконання скрипту створюється інтерфейс користувача – адміністратора, який формує сертифікати користувачів, групи користувачів з відповідними правами доступу. Сформовані сертифікати користувачів надсилаються на хостову машину, де розгорнуто віртуальне середовище у контейнері Proxmox.

Спочатку тестова модель віртуальної системи використовувалася для перевірки роботоздатності VPN-тунелю. Для цього було виконано обмін різнорозмірними ICMP-пакетами.

При аналізі безпеки використовувалася програма Wireshark, яка відстежувала потоки даних, що проходять через тунель VPN. Після фільтрації тільки тих пакетів, що проходять через тунель VPN, можна побачити, що їх вміст зашифровано (рисунок 3).

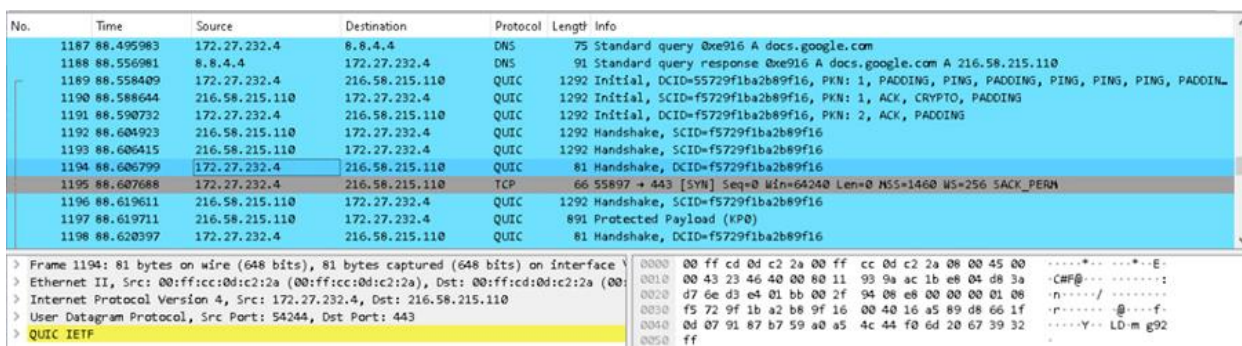


Рис. 3. Аналіз відфільтрованих пакетів

Таким чином, маємо, що із збільшенням кількості рівнів тунелювання спостерігається зменшення швидкості передачі даних через підвищення обчислювальної складності та часу шифрування (рисунок 4). При цьому загальна затримка залишається постійною, оскільки вона враховує сумарний вплив процесу шифрування та передачі для кожного рівня. Це показує вплив кожного додаткового рівня тунелювання на продуктивність. Експеримент показав, що збільшення кількості рівнів тунелювання також впливає на ефективність використання ресурсів.

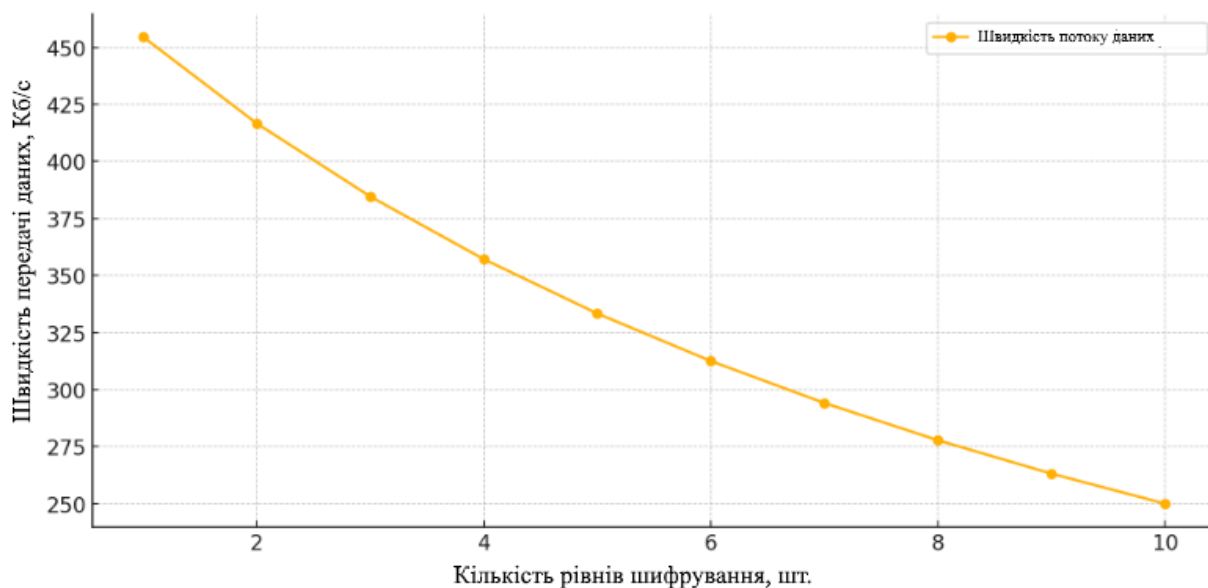


Рис. 4. Зміна значення швидкості передачі даних в залежності від кількості рівнів

Постановка експерименту була виконана на базі лабораторії обчислювальних систем і мережних технологій кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки.

### Висновки

У цій статті було запропоновано та детально проаналізовано метод багаторівневого VPN-тунелювання для забезпечення безпечного віддаленого доступу до вузлів екстранет-мережі. Метод дозволяє створити кілька рівнів шифрування та автентифікації, що підвищує рівень безпеки і забезпечує захист конфіденційних даних під час передачі через загальнодоступні мережі. Наукова новизна полягає у подальшому розвитку багаторівневих архітектур, які дозволяють адаптивно підходити до балансування між продуктивністю, безпекою та ефективністю використання ресурсів.

Аналіз ефективності методу показав, що збільшення кількості рівнів тунелювання призводить до підвищення захисту від несанкціонованого доступу, зменшуючи ймовірність успішної атаки. Однак, швидкість передачі даних зменшується, а загальна ресурсозатратність системи зростає, особливо при використанні складних алгоритмів шифрування та автентифікації. Введення коефіцієнтів у (1) показує, що обчислювальні витрати і затримки можуть зростати значно швидше, ніж лінійно, при збільшенні кількості рівнів, що підтверджує необхідність оптимізації та балансування параметрів системи за пріоритетами задачі, яка вирішується при застосуванні даного методу.

При практичному застосуванні методу необхідно враховувати характер даних, які передаються, вимоги до захищеності, і ресурси, доступні для реалізації VPN-системи. Таким чином, запропонований метод може бути корисним для малого та середнього бізнесу, який прагне забезпечити надійний захист своїх екстранет-мереж при віддаленому доступі, особливо в умовах обмеженого ресурсного забезпечення.

Майбутні дослідження можуть бути спрямовані на подальшу оптимізацію методу, наприклад, шляхом адаптивного налаштування рівнів тунелювання в реальному часі або інтеграції новітніх криптографічних алгоритмів, щоб підвищити як продуктивність, так і безпеку системи.

### Список використаної літератури

1. Федорова Ю. Інноваційні інформаційні технології в підготовці та управлінні персоналом. *Adaptive Management Theory and Practice Economics*. 2021. Т. 11, № 22. URL: [https://doi.org/10.33296/2707-0654-11\(22\)-11](https://doi.org/10.33296/2707-0654-11(22)-11).
2. Биців М. М. Значення інформаційних технологій як чинника інновацій у діяльності малого та середнього бізнесу // *Бізнес, інновації, менеджмент: проблеми та перспективи*: збірник тез доповідей II Міжнародної наук.-практ. конференції, м. Київ, 22 квітня 2024 р. / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2021. С. 206–207.
3. Дзямулич Микола, Шматковська Тетяна. Вплив сучасних інформаційних систем і технологій на формування цифрової економіки. *Економічний форум*. 2022. Т. 1, № 2. С. 3–8. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2308-8559-2022-2-1>.
4. Жиглей І. В., Лайчук С. М., Поліщук І. Р. Використання інформаційних технологій у бухгалтерському обліку. *Економіка, управління та адміністрування*. 2024. № 1(107). С. 95–102. URL: [https://doi.org/10.26642/ema-2024-1\(107\)-95-102](https://doi.org/10.26642/ema-2024-1(107)-95-102).
5. He W., Zhang Z., Li W. Information technology solutions, challenges, and suggestions for tackling the COVID-19 pandemic. *International Journal of Information Management*. 2021. Vol. 57. P. 102287. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102287>.
6. Верховський І., Ткачов В. Методи побудови віртуальних тунелів extranet-систем. *Scientific review*. 2023. Т. 4, № 89. С. 22. URL: [https://doi.org/10.26886/2311-4517.4\(89\)2023.2](https://doi.org/10.26886/2311-4517.4(89)2023.2).
7. Security Assessment and Evaluation of VPNs: A Comprehensive Survey / H. Abbas et al. *ACM Computing Surveys*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1145/3579162>.
8. Security vs Bandwidth: Performance Analysis Between IPsec and OpenVPN in Smart Grid / K. Ghanem et al. 2022 *International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, Shenzhen, China, 19–22 July 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/isncc55209.2022.9851717>.
9. Chua C. H., Ng S. C. SSL VPN over TCP and UDP Tunnels. *CCIOT 2022: 2022 7th International Conference on Cloud Computing and Internet of Things*, Okinawa Japan. New York, NY, USA, 2022. URL: <https://doi.org/10.1145/3569507.3569511>.
10. OpenVPN is Open to VPN Fingerprinting / D. Xue et al. *Communications of the ACM*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1145/3618117>.
11. Amaldeep S., Sankaran S. Cross Protocol Attack on IPsec-based VPN. 2023 *11th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS)*, Chattanooga, TN, USA, 11–12 May 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/isdfs58141.2023.10131787>.
12. Сучасні інформаційні технології та системи [Електронний ресурс]: монографія / Н. Г. Аксак, Л. Е. Гризун, О. В. Щербаків та ін.; за заг. ред. д-ра екон. наук, професора В. С. Пономаренка. Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2022. 271 с.
13. Чепурна І. С. Алгоритм організації віддаленого доступу до захищеного сегменту корпоративних комп'ютерних мереж. *Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті: матеріали 28-го Міжнар. молодіж. форуму*, 16–18 квітня 2024 р. Харків : ХНУРЕ, 2024. Т. 5. С. 76–78. DOI: <https://doi.org/10.30837/IYF.PCEIP.2024.076>.

14. Santhanamahalingam S., Alagarsamy S., Subramanian K. A study of cloud-based VPN establishment using network function virtualization technique. *2022 3rd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)*, Trichy, India, 20–22 October 2022. 2022. URL: <https://doi.org/10.1109/icosec54921.2022.9951894>.
15. Новородовський В. Інформаційна безпека України в умовах російської агресії. *Society. Document. Communication*. 2020. № 9. С. 150–179. URL: <https://doi.org/10.31470/2518-7600-2020-9-150-1179>.
16. Moltafet M., Leinonen M., Codreanu M. Average Age of Information for a Multi-Source M/M/1 Queueing Model With Packet Management. *2020 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Los Angeles, CA, USA, 21–26 June 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/isit44484.2020.9174099>.

### References

1. Fedorova, Y. (2021). Innovatsiini informatsiini tekhnologii v pidhotovtsi ta upravlinni personalom [Innovative information technologies in training and personnel management]. *Adaptive Management Theory and Practice Economics*, 11(22). [https://doi.org/10.33296/2707-0654-11\(22\)-11](https://doi.org/10.33296/2707-0654-11(22)-11).
2. Bytsiv, M. M. (2021). Znachennia informatsiinykh tekhnologii yak chynnyka innovatsii u diialnosti maloho ta serednioho biznesu [The importance of information technology as a factor of innovation in the activities of small and medium-sized businesses]. In *Business, Innovations, Management: Problems and Prospects: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference* (pp. 206–207). Kyiv, Ukraine: National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».
3. Dziambulich, M., & Shmatkovska, T. (2022). Vplyv suchasnykh informatsiinykh system i tekhnologii na formuvannia tsyfrovoi ekonomiky [The impact of modern information systems and technologies on the formation of the digital economy]. *Ekonomichnyi Forum*, 1(2), 3–8. <https://doi.org/10.36910/6775-2308-8559-2022-2-1>.
4. Zihlei, I. V., Laichuk, S. M., & Polishchuk, I. R. (2024). Vykorystannia informatsiinykh tekhnologii u bukhhalterskomu obliku [The use of information technology in accounting]. *Ekonomika, upravlinnia ta administruvannia*, 1(107), 95–102. [https://doi.org/10.26642/ema-2024-1\(107\)-95-102](https://doi.org/10.26642/ema-2024-1(107)-95-102).
5. He, W., Zhang, Z., & Li, W. (2021). Information technology solutions, challenges, and suggestions for tackling the COVID-19 pandemic. *International Journal of Information Management*, 57, 102287. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102287>.
6. Verkhovskiy, I., & Tkachov, V. (2023). Metody pobudovy virtualnykh tunneliv extranet-system [Methods of building virtual tunnels for extranet systems]. *Scientific Review*, 4(89), 22. [https://doi.org/10.26886/2311-4517.4\(89\)2023.2](https://doi.org/10.26886/2311-4517.4(89)2023.2).
7. Abbas, H., et al. (2023). Security Assessment and Evaluation of VPNs: A Comprehensive Survey. *ACM Computing Surveys*. <https://doi.org/10.1145/3579162>.
8. Ghanem, K., et al. (2022). Security vs Bandwidth: Performance Analysis Between IPsec and OpenVPN in Smart Grid. In *2022 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, Shenzhen, China. <https://doi.org/10.1109/isncc55209.2022.9851717>.
9. Chua, C. H., & Ng, S. C. (2022). SSL VPN over TCP and UDP Tunnels. In *CCIOT 2022: 2022 7th International Conference on Cloud Computing and Internet of Things*, Okinawa, Japan. <https://doi.org/10.1145/3569507.3569511>.
10. Xue, D., et al. (2024). OpenVPN is Open to VPN Fingerprinting. *Communications of the ACM*. <https://doi.org/10.1145/3618117>.
11. Amaldeep, S., & Sankaran, S. (2023). Cross Protocol Attack on IPsec-based VPN. In *2023 11th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS)*, Chattanooga, TN, USA. <https://doi.org/10.1109/isdfs58141.2023.10131787>.
12. Aksak, N. H., Gryzun, L. E., & Shcherbakov, O. V. (2022). Suchasni informatsiini tekhnologii ta systemy [Modern information technologies and systems] (Monograph). Kharkiv, Ukraine: KhNEU im. S. Kuznetsa.
13. Chepurna, I. S. (2024). Alhorytm orhanizatsii viddalenooho dostupu do zakhyschenoho segmentu korporatyvnykh komputeryvnykh merezh [Algorithm for organizing remote access to the protected segment of corporate computer networks]. In *Radioelektronika ta molod u XXI stolitti: Materialy 28-ho Mizhnarodnogo molodizhnogo forumu* (Vol. 5, pp. 76–78). Kharkiv, Ukraine: KhNURE. <https://doi.org/10.30837/IYF.PCEIP.2024.076>.
14. Santhanamahalingam, S., Alagarsamy, S., & Subramanian, K. (2022). A study of cloud-based VPN establishment using network function virtualization technique. In *2022 3rd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)*, Trichy, India. <https://doi.org/10.1109/icosec54921.2022.9951894>.
15. Novorodovskyi, V. (2020). Informatsiina bezpeka Ukrainy v umovakh rosiiskoi ahresii [Information security of Ukraine in the conditions of Russian aggression]. *Society. Document. Communication*, (9), 150–179. <https://doi.org/10.31470/2518-7600-2020-9-150-1179>.
16. Moltafet, M., Leinonen, M., & Codreanu, M. (2020). Average Age of Information for a Multi-Source M/M/1 Queueing Model With Packet Management. In *2020 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, Los Angeles, CA, USA. <https://doi.org/10.1109/isit44484.2020.9174099>.

Л. С. ФОНАР

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри штучного інтелекту та аналізу даних  
Національний університет «Одеська політехніка»  
ORCID: 0000-0002-7478-6742

О. С. ЛОТІС

аспірант кафедри штучного інтелекту та аналізу даних  
Національний університет «Одеська політехніка»  
ORCID: 0009-0008-1395-1039

## АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ ІТ ПРОЄКТІВ В УМОВАХ ВИГОРАННЯ

*В сучасних умовах питання управління ризиками ІТ проєктів стає критично важливим, крім того пандемія та пов'язані з нею обмеження, а також військові дії зробили дистанційну роботу нормою для багатьох організацій, що викликає нові виклики у сфері управління ІТ проєктами. Наукова новизна полягає у комплексному підході до аналізу ризиків ІТ проєктів, що враховує специфічні умови сучасних викликів, зокрема військових дій та пов'язаних з ними стресових факторів для команди. У дослідженні розглядаються як внутрішні, так і зовнішні ризики, включаючи психологічні аспекти, що сприяють вигоранню працівників. Використовуючи методологію SWOT-аналізу, досліджено внутрішні та зовнішні ризики, серед яких виокремлено високий рівень відповідальності та навантаження на ключових членів команди, недостатню підтримку психологічного стану, нереалістичні терміни та обсяги роботи, погану комунікацію, військові дії, обмеження електроенергії, дистанційну роботу евакуйованих працівників, високу несподіваність змін, недостатню участь ключових стейкхолдерів та зміни в законодавстві. Визначено вплив кожного ризику на параметри проєкту (час, вартість, зміст), що дозволяє створити більш точну картину потенційних загроз та їхнього впливу на успішність проєкту. Запропоновані нові підходи до управління ризиками, враховують проблему вигорання учасників команди та комплексний вплив зовнішніх та внутрішніх факторів. ІТ компанії повинні бути готові до швидкої адаптації до змін у законодавстві та політичній ситуації. Це включає регулярний моніторинг зовнішнього середовища та розробку відповідних планів дій, необхідно передбачити стратегії для роботи в умовах високої несподіваності та невизначеності, включаючи плани резервного доступу до ресурсів та забезпечення альтернативних шляхів виконання завдань. Врахування проблеми вигорання учасників є важливим для забезпечення успішної реалізації ІТ-проєктів. Ефективне управління стресом, підтримка психологічного стану працівників та створення сприятливого робочого середовища сприятимуть підвищенню продуктивності, якості роботи та загального успіху проєкту.*

**Ключові слова:** управління ризиками, вигорання, ІТ проєкти, SWOT-аналіз, проєктні ризики, успішність проєкту, команда проєкту.

L. S. FONAR

PhD in Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Artificial Intelligence  
and Data Analysis  
Odesa Polytechnic National University  
ORCID: 0000-0002-7478-6742

O. S. LOTIS

Postgraduate Student at the Department of Artificial Intelligence  
and Data Analysis  
Odesa Polytechnic National University  
ORCID: 0009-0008-1395-1039

## ANALYSIS OF RISK MANAGEMENT IN IT PROJECTS UNDER BURNOUT CONDITIONS

*In modern conditions, the issue of risk management in IT projects is becoming critically important. Additionally, the pandemic and its associated restrictions, as well as military actions, have made remote work the norm for many organizations, introducing new challenges in IT project management. The scientific novelty lies in a comprehensive approach to analyzing IT project risks, considering the specific conditions of contemporary challenges, particularly military actions and the associated stress factors for the team. The study examines both internal and external risks, including psychological aspects that contribute to employee burnout. Using the SWOT analysis methodology, the research*

*investigates internal and external risks, highlighting high levels of responsibility and workload on key team members, insufficient support for psychological well-being, unrealistic deadlines and workloads, poor communication, military actions, power supply restrictions, remote work of evacuated employees, high unpredictability of changes, insufficient participation of key stakeholders, and legislative changes. The impact of each risk on project parameters (time, cost, scope) is determined, providing a more accurate picture of potential threats and their impact on project success. New approaches to risk management are proposed, taking into account the problem of team members' burnout and the complex influence of external and internal factors. IT companies must be prepared for rapid adaptation to changes in legislation and the political situation. This includes regular monitoring of the external environment and developing appropriate action plans, as well as foreseeing strategies for working in conditions of high unpredictability and uncertainty, including backup access to resources and ensuring alternative ways to complete tasks. Considering the issue of team members' burnout is crucial for ensuring the successful implementation of IT projects. Effective stress management, support for employees' psychological well-being, and creating a favorable work environment will contribute to increased productivity, work quality, and overall project success.*

**Key words:** risk management, burnout, IT projects, SWOT analysis, project risks, project success, project team.

### Постановка проблеми

В умовах підвищеного стресу через військові дії та нестабільність, підтримка психологічного стану команди набуває першочергового значення. Врахування цього аспекту у дослідженні дозволяє розробити більш ефективні стратегії управління проектами. Ухвалення проектних рішень в IT-проектах зазвичай відбувається в умовах ризику та невизначеності. Ефективне управління ризиками в IT-проектах потребує комплексного підходу, який враховує як внутрішні, так і зовнішні фактори. Розробка та впровадження відповідних стратегій допоможе мінімізувати вплив ризиків та забезпечити успішну реалізацію проектів в умовах високої нестабільності.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю ефективного управління IT-проектами в умовах високої невизначеності, а також потребою у розробці нових стратегій для мінімізації ризиків та забезпечення стабільної роботи команд. Врахування вигорання учасників є критично важливим при управлінні IT-проектами з наступних причин: вигорання призводить до зниження ефективності та продуктивності працівників, може призвести до необхідності додаткового часу та ресурсів на виправлення помилок, що збільшує загальну вартість проекту та затягує його реалізацію, негативно впливає на комунікацію в команді, знижує здатність працівників до генерування нових ідей та вирішення складних задач – це може обмежити інноваційність та конкурентоспроможність проекту.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Урахування причин виникнення ризиків та вчасне їх корегування є критично важливими для забезпечення ефективності та стійкості IT-проектів [1-3], а також для запобігання вигоранню команди [4-6]. Використання комбінованих методологій, таких як Agile і Kanban [7, 8], дозволяє краще управляти ризиками та підтримувати мотивацію і продуктивність команди на високому рівні, а комплексний підхід та дослідження процесів вигорання в командах IT-проектів має важливе значення для покращення ефективності проектів. Результати досліджень показують, що вимоги до роботи впливають на виснаження та залучення, тоді як робочі ресурси пов'язані зі збільшенням або зменшенням ризику вигорання [9].

Огляд науково-дослідних робіт свідчить про те, що виснаження в основному прогнозується вимогами роботи, а також браком робочих ресурсів [10]. Стрес і вигорання є не лише індивідуальними проблемами, але й на них впливають національні економічні, культурні та політичні фактори [11].

### Формулювання мети дослідження

Ідентифікація ризиків у контексті аналізу проектів, особливо з урахуванням процесів вигорання, є важливим кроком для забезпечення ефективності та стійкості команди. Для цього можна використовувати SWOT-аналіз [12] та діаграми ризиків по ступеням впливу ситуацій ризику на відповідні параметри, які допоможуть виявити сильні та слабкі сторони, а також можливості та загрози, що можуть вплинути на ризик вигорання. Діаграми ризиків дозволяють відстежувати зміни у впливі ризиків з часом і коригувати стратегії управління ризиками відповідно до актуальних даних.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Основними причинами виникнення ризиків, що можуть призвести до вигорання учасників команди IT-проектів, є:

- неповна або неточна інформація про продукт та проектне середовище, що може створити додаткове навантаження на команду, яка змушена працювати в умовах невизначеності, ці фактори можуть призвести до помилок, необхідності переробки та збільшення робочого навантаження, що підвищує ризик вигорання;
- конфлікти інтересів стейкхолдерів, невміння або неможливість узгодити ці вимоги може призвести до підвищення ризику вигорання;
- встановлення надто амбітних або непрактичних термінів може призвести до постійного стресу, недостатній час на виконання завдань змушує команду працювати понаднормово що значно підвищує ризик перенапруження команди;

- недостатня доступність необхідних ресурсів, будь то робоча сила, матеріали чи технології, може ускладнювати виконання завдань, це призводить до додаткового навантаження на команду, яка змушена працювати в умовах дефіциту ресурсів;
- погана комунікація під час виконання завдань, очікувань і прогресу може призвести до непорозуміння та координаційних проблем і створити додатковий стрес;
- військові дії підвищують загальний рівень стресу та тривожності серед працівників, небезпека для життя, загроза окупації та інші фактори можуть значно знизити продуктивність та збільшити ризик вигорання;
- можливі перебої з постачанням електроенергії ускладнюють виконання завдань та дотримання термінів, це створює додатковий тиск на команду, яка змушена працювати в непередбачуваних умовах;
- постійний стрес і тривога за близьких, невизначеність майбутнього, особисті проблеми через зміну місця роботи або проживання значної частини працівників IT-сфери можуть суттєво впливати на психологічний стан команди та підвищувати ризик вигорання;
- вимушена дистанційна робота може призводити до ізоляції та відчуження від решти команди, що негативно впливає на командний дух і співпрацю, відсутність особистого спілкування ускладнює обмін ідеями, вирішення проблем та прийняття спільних рішень, знижує мотивацію та ефективність роботи.



Рис. 1. SWOT-аналіз

Таблиця 1 відображає основні внутрішні та зовнішні ризики, які можуть впливати на успішність IT-проекту з урахуванням проблеми вигорання команди. Кожен з цих ризиків може мати значний вплив на продуктивність та ефективність проекту, тому їх важливо урахувувати при розробці планів управління ризиками:

Таблиця 1

**Ризики внутрішнього та зовнішнього середовища з урахуванням вигорання**

Середовище проекту	Ризики з урахуванням проблеми вигорання
Внутрішнє	<ul style="list-style-type: none"> <li>– високий рівень відповідальності та навантаження команди;</li> <li>– недостатня підтримка психологічного стану членів команди;</li> <li>– нереалістичні терміни та обсяги роботи, що призводять до стресу;</li> <li>– погана комунікація між членами команди.</li> </ul>
Зовнішнє	<ul style="list-style-type: none"> <li>– військові дії та стрес через нестабільність у регіоні;</li> <li>– обмеження електроенергії, що призводить до перебоїв у роботі;</li> <li>– дистанційна робота евакуйованих працівників;</li> <li>– висока невизначеність щодо змін;</li> <li>– відсутність або недостатня участь ключових стейкхолдерів у процесах проекту, що може призвести до неправильних рішень та затримок;</li> <li>– зміни в законодавстві, які стосуються сфери діяльності проекту, можуть вимагати адаптації проектних процесів.</li> </ul>

Рейтинг ризиків на підставі комбінації та оцінювання їх ймовірності та ступеня впливу [3] – це методологія оцінки, яка дозволяє визначити, які ризики є найбільш значущими для проекту. Основні кроки цього процесу включають:

- ідентифікація ризиків – визначення потенційних загроз для проекту, які можуть виникнути внаслідок внутрішніх або зовнішніх факторів;
- визначення ймовірності того, що ризик виникне – може бути висока, середня або низька ймовірність в залежності від характеру ризику та обставин проекту;

- оцінка ступеня впливу, який матиме цей ризик на проект, якщо він виникне, також може бути високим, середнім або низьким.
- створення матриці ризиків на основі оцінок ймовірності та ступеня впливу, яка відображає рівень значущості кожного ризику. Зазвичай її представляють у вигляді матриці з чотирма квадрантами, де на осі X – ймовірність (низька до високої), а на осі Y – ступінь впливу (низький до високий).
- оцінка та пріоритезація ризиків на основі ймовірності та ступеня впливу.

Ризики з високим рівнем значущості потребують уваги та планування мір по мінімізації їх наслідків або уникнення. Наприклад, ризики з високою ймовірністю і великим ступенем впливу отримують високий пріоритет і потребують негайної уваги у плануванні та управлінні ризиками проекту.

Ранжування ризиків представлено у таблиці 2, кожен ризик оцінюється за ймовірністю виникнення (від 1 до 5), величиною можливих втрат (від 1 до 5), ступенем впливу (як добуток ймовірності і втрат), та рівнем загрози, що класифікується на прийнятний, виправданий, або неприпустимий.

Таблиця 2

**Ранжування ризиків IT-проектів з урахуванням проблеми вигорання**

Ризик	Ймовірність	Величина втрат	Ступінь впливу	Рівень загрози
Велике навантаження	3 ймовірна	4 висока	12 істотний	12 неприпустимий
Недостатня підтримка психологічного стану	3 ймовірна	3 середня	9 помірний	9 виправданий
Нереалістичні терміни та обсяги роботи	3 ймовірна	4 висока	12 істотний	12 неприпустимий
Погана комунікація	3 ймовірна	3 середня	9 помірний	9 виправданий
Військові дії та стрес	2 малоймовірна	4 висока	8 незначний	8 виправданий
Обмеження електроенергії	2 малоймовірна	3 середня	6 ігноровані	6 прийнятний
Дистанційна робота	3 ймовірна	4 висока	12 істотний	12 неприпустимий
Висока несподіваність	3 ймовірна	4 висока	12 істотний	12 неприпустимий
Відсутність участі стейкхолдерів	2 малоймовірна	4 висока	8 незначний	8 виправданий
Зміни в законодавстві	1 слабо-ймовірна	4 висока	4 ігноровані	8 прийнятний

Ця таблиця показує, як високий рівень відповідальності та навантаження на ключових членів команди створює істотний ризик через ймовірність його появи та величину втрат, що підкреслює необхідність ефективного управління навантаженням на команду.

Вплив ризику на результативність IT проекту визначається зміною значень основних параметрів управління проектами: часу (time), вартості (cost) і змісту (scope). Зміни в цих параметрах, викликані ризиками, оцінюються експертами на основі їх впливу на успішність та результати проекту (табл. 3):

Таблиця 3

**Оцінка впливу ситуацій ризику на відповідні параметри**

Ризик	Параметр	Оцінка впливу та опис впливу
1	2	3
Високий рівень навантаження	Час	7 Сильний вплив, значний перерозподіл часу
	Вартість	6 Середній вплив, можливі додаткові витрати
	Зміст	5 Середній вплив, можливі зміни в змісті проекту
Недостатня підтримка психологічного стану	Час	6 Середній вплив, можливе зниження продуктивності
	Вартість	4 Середній вплив, витрати на підтримку та навчання
	Зміст	3 Слабкий вплив, незначні зміни в змісті через зниження якості роботи
Нереалістичні терміни та обсяги роботи	Час	8 Сильний вплив, значне порушення термінів
	Вартість	6 Середній вплив, додаткові витрати на затримки
	Зміст	4 Середній вплив, можливі зміни в змісті проекту через необхідність скорочення часу на завдання
Погана комунікація	Час	5 Середній вплив, затримки через непорозуміння
	Вартість	4 Середній вплив, витрати на комунікаційні інструменти
	Зміст	3 Слабкий вплив, втрата важливої інформації, помилки
Військові дії та стрес	Час	9 Сильний вплив, можливі зупинки роботи
	Вартість	8 Сильний вплив, витрати на безпеку або релокацію
	Зміст	7 Сильний вплив, зупинку роботи або втрата ресурсів
Обмеження електроенергії	Час	8 Сильний вплив, можливі значні затримки
	Вартість	7 Сильний вплив, витрати на забезпечення живлення
	Зміст	5 Середній вплив, можливі втрати часу та ресурсів



Закінчення табл. 3

1	2	3
Дистанційна робота евакуйованих працівників	Час	7 Сильний вплив, можливі затримки через обмежений доступ до ресурсів
	Вартість	6 Середній вплив, витрати на забезпечення ресурсів
	Зміст	4 Середній вплив, обмеження доступу до важливих даних
Висока невизначеність щодо змін	Час	7 Сильний вплив, затримки через непередбачувані зміни
	Вартість	5 Середній вплив, додаткові витрати на адаптацію
	Зміст	6 Середній вплив, необхідність адаптації проєкту
Відсутність або недостатня участь стейкхолдерів	Час	6 Середній вплив, відсутність необхідної підтримки
	Вартість	4 Середній вплив, витрати на залучення стейкхолдерів
	Зміст	5 Середній вплив, відсутність важливих вказівок та рішень
Зміни в законодавстві, які стосуються сфери діяльності проєкту	Час	8 Сильний вплив, можливі затримки через необхідність адаптації до нових вимог
	Вартість	7 Сильний вплив, можливі додаткові витрати на адаптацію проєкту до нових законодавчих вимог
	Зміст	6 Середній вплив, можливі зміни в змісті через необхідність відповідати новим вимогам

Використовуючи дані таблиці 3, побудовані діаграми ризиків по ступеням впливу ситуацій ризику на відповідні параметри (рис. 2):

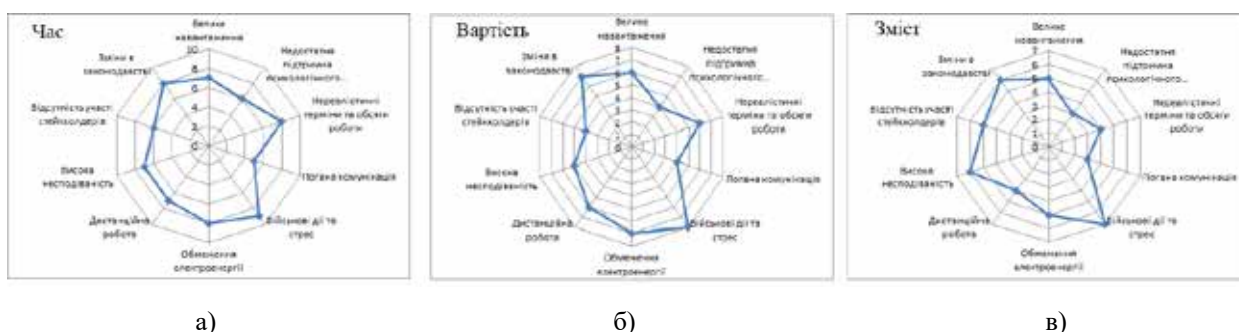


Рис. 2. Вплив ситуацій ризику на час (а), вартість (б), зміст (в)

**Висновки**

Аналіз таблиці ризиків дозволяє виявити ключові фактори, що впливають на результативність ІТ проєкту з урахуванням проблеми вигорання. Найбільш значущими ризиками є військові дії та стрес через нестабільність у регіоні, обмеження електроенергії та дистанційна робота евакуйованих працівників з обмеженим доступом до необхідних ресурсів. Військові дії мають сильний вплив на всі параметри (час, вартість, зміст), що може призвести до значних затримок, великих додаткових витрат та необхідності змін у змісті проєкту. Подібний вплив має і обмеження електроенергії, що спричиняє сильний вплив на час і вартість та середній вплив на зміст проєкту.

Дистанційна робота евакуйованих працівників має сильний вплив на час, а також середній вплив на вартість і зміст. Це пояснюється складністю доступу до необхідних ресурсів, що може ускладнити виконання завдань у встановлені терміни. Зміни в законодавстві також мають сильний вплив на час і вартість, оскільки можуть вимагати значних додаткових зусиль та витрат на адаптацію проєктних процесів.

Ризики, пов'язані з високим рівнем відповідальності та навантаження на ключових членів команди, нереалістичними термінами та обсягами роботи, а також недостатньою підтримкою психологічного стану членів команди, мають середній або сильний вплив на час і вартість, що також може призвести до змін у змісті проєкту.

Недостатня участь стейкхолдерів і погана комунікація між членами команди мають середній вплив на час і зміст проєкту, що вказує на необхідність поліпшення комунікаційних процесів та залучення ключових стейкхолдерів. Забезпечення психологічної підтримки та організація тренінгів з управління стресом для зниження негативного впливу на членів команди може значно поліпшити ситуацію. Також можна рекомендувати впровадження систематичних засобів комунікації між членами команди та ключовими стейкхолдерами для забезпечення своєчасного обміну інформацією та участі у прийнятті рішень.

**Список використаної літератури**

1. Журан О. А., Глава М. Г. Управління ризиками в ІТ-проєктах. *In Project, Program, Portfolio Management. P3M (Vol. 1)*, ІКС ОНПУ, 2016. – С. 46–48.
2. Фонар Л.С., Журан О.А., Коновалов О.С., Панін В.О. Аналіз ризиків іт-проєкту вебресурсу для комунікації освітніх закладів. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2023. Т. 6, № 1., 156 с., С. 37–45. <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2023-6-1-4>

3. ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 (ІЕС/ISO 31010:2009,ІДТ). Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику.
4. Christina Maslach, Wilmar B. Schaufeli, Michael P. Leiter Job Burnout. *Annual Review of Psychology* 2001 52:1, PP. 397–422. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.52.1.397>
5. International Classification of Diseases ICD-11. URL: <https://icd.who.int/en> (date of access: 20.07.2024).
6. V. Zanora, S. Momot, D. Bedrii, L. Fonar Conflict management in enterprise development project teams. *Academic Review*. 2023. Т. 1, № 58. С. 187–204. URL: <https://doi.org/10.32342/2074-5354-2023-1-58-14> (date of access: 20.07.2024).
7. Schwaber, Ken; Beedle, Mike (2001). Agile software development with Scrum. *Prentice HallPTR Upper Saddle River*, NJ, USA, 2001, P. 158
8. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). Seventh Edition : Project Management Institute, 2021. 250 p.
9. Metin, Baran. (2010). The antecedents and consequences of burnout, work engagement and workaholism.
10. Schaufeli, Wilmar. (2004). Job demands, job resources, and their relationship with burnout and engagement: A multi-sample study. *Journal of Organizational Behavior*. 25. 293–315. <https://doi.org/10.1002/job.248>
11. Butz, M. & Mrazova, M. & Deaconu, D. & Czirfusz, A. (2024). Stress and Burnout in the European Workplace and the Role of Resilience. *Clinical Social Work and Health Intervention*. 15. DOI: 10.22359/cswhi\_15\_3\_01
12. Шляхта О.М. SWOT-аналіз як інструмент стратегічного менеджменту підприємства. *Економічний простір. Придніпровська державна академія будівництва та архітектури*. 2012. № 68. С. 301–309. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/еспрос\\_2012\\_68\\_35](http://nbuv.gov.ua/UJRN/еспрос_2012_68_35) (дата звернення: 11.07.2024).

#### References

1. Zhuran O. A., Hlava M. H. (2016) Upravlinnia ryzykamy v IT-proektakh [Risk Management in IT Projects]. *In Project, Program, Portfolio Management*. P3M (Vol. 1), IKS ONPU, – P. 46–48.
2. Fonar L.S., Zhuran O.A., Konovalov O.S., Panin V.O. (2023) Analiz ryzykiv it-proiektu vebresursu dlia komunikatsii osvitynih zakladiv. [Risk analysis of an it project for a web resource aimed at communication in educational institutions] *Prykladni pytannia matematychnoho modeliuвання*. Vol. 6, № 1., 156 p., P. 37–45.
3. DSTU IES/ISO 31010:2013 (IES/ISO 31010:2009,ІДТ). Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику.
4. Christina Maslach, Wilmar B. Schaufeli, Michael P. Leiter (2001) Job Burnout. *Annual Review of Psychology* 52:1, PP. 397–422.
5. International Classification of Diseases ICD-11. URL: <https://icd.who.int/en>
6. V. Zanora, S. Momot, D. Bedrii, L. Fonar (2023). Conflict management in enterprise development project teams. *Academic Review*. Т. 1, № 58. P. 187–204.
7. Schwaber, Ken; Beedle, Mike (2001). Agile software development with Scrum. *Prentice HallPTR Upper Saddle River*, NJ, USA, 2001, P. 158
8. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). Seventh Edition : Project Management Institute, 2021. 250 p.
9. Metin, Baran. (2010). The antecedents and consequences of burnout, work engagement and workaholism.
10. Schaufeli, Wilmar. (2004). Job demands, job resources, and their relationship with burnout and engagement: A multi-sample study. *Journal of Organizational Behavior*. 25. 293–315. <https://doi.org/10.1002/job.248>
11. Butz, M. & Mrazova, M. & Deaconu, D. & Czirfusz, A. (2024). Stress and Burnout in the European Workplace and the Role of Resilience. *Clinical Social Work and Health Intervention*. 15. DOI: 10.22359/cswhi\_15\_3\_01.
12. Shliakhta, O.M. (2012). SWOT-analiz yak instrument stratehichnoho menedzhmentu pidpriemstva. [SWOT analysis as a tool of strategic enterprise management]. *Ekonomichnyi prostir: Prydniprovska derzhavna akademiia budivnytstva ta arkhitektury*. Vol. 68. P. 301–309.

УДК 681.5

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.39>

Д. Р. ЧАНКВЕТАДЗЕ

аспірант

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ORCID: 0009-0001-5958-1706

Л. І. ФЕШАНИЧ

кандидат технічних наук, доцент

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ORCID: 0000-0002-5156-2199

## ІНТЕГРАЦІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВИРОБНИЦТВО ДРОНІВ: ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ

У статті розглядається сучасний підхід до автоматизації виробництва дронів через інтеграцію новітніх технологій, зокрема штучного інтелекту (ШІ) та гнучких виробничих систем. Важливість ШІ в автоматизації підкреслюється через можливість адаптації виробничих ліній та зменшення витрат завдяки прогнозуванню збоїв і оптимізації процесів на основі аналізу великих даних.

Проаналізовані методи автоматизації, такі як правила навчання нейронних мереж (правило Хебба, "дельта", змагання та градієнтний спуск), використовуються для вдосконалення процесів на різних етапах виробництва. Підходи навчання з підкріпленням, зокрема алгоритм Deep Q-Learning, застосовуються для оптимізації складних виробничих систем, забезпечуючи динамічну адаптацію до непередбачуваних умов.

Система симуляційного моделювання грає ключову роль в оптимізації виробничих процесів, дозволяючи тестувати реакції на зміни умов без реального втручання. Використання фізичних моделей та інтелектуальних систем управління для моніторингу та контролю якості допомагає підвищити ефективність і зменшити кількість дефектів.

Основна увага приділяється застосуванню алгоритмів глибокого навчання, що моделюють принципи роботи нейронних мереж, для підвищення ефективності виробництва та зменшення кількості відмов обладнання. Системи автоматизації, такі як SCADA, DCS, PLC, MES, ERP та роботизовані виробничі системи, демонструють переваги у підвищенні продуктивності та якості виготовленої продукції.

Цей новий підхід до автоматизації виробництва дронів забезпечує значні переваги, включаючи зменшення витрат, підвищення гнучкості та адаптивності, а також поліпшення якості кінцевих продуктів через інтеграцію передових технологій та методів управління.

**Ключові слова:** автоматизація, штучний інтелект, цифрові технології, Deep Q-Learning, виробництво дронів, ефективність.

D. R. CHANKVETADZE

Postgraduate Student

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

ORCID: 0009-0001-5958-1706

L. I. FESHANICH

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

ORCID: 0000-0002-5156-2199

## INTEGRATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND DIGITAL TECHNOLOGIES IN DRONE MANUFACTURING: INNOVATIVE APPROACHES TO ENHANCING EFFICIENCY

The article explores a modern approach to drone manufacturing automation through the integration of cutting-edge technologies, particularly artificial intelligence (AI) and flexible manufacturing systems. The importance of AI in automation is highlighted by its ability to adapt production lines and reduce costs through predictive failure analysis and process optimization based on big data analytics.

The examined automation methods, such as neural network learning rules (Hebb's rule, delta rule, competition, and gradient descent), are utilized to enhance processes at various stages of production. Reinforcement learning approaches, particularly the Deep Q-Learning algorithm, are applied to optimize complex manufacturing systems, providing dynamic adaptation to unpredictable conditions.

*Simulation modeling plays a key role in optimizing manufacturing processes, allowing for testing responses to changing conditions without real-world intervention. The use of physical models and intelligent control systems for monitoring and quality control helps increase efficiency and reduce the number of defects.*

*The focus is on the application of deep learning algorithms that model the principles of neural networks to improve production efficiency and reduce equipment failures. Automation systems such as SCADA, DCS, PLC, MES, ERP, and robotic manufacturing systems demonstrate advantages in improving productivity and product quality.*

*This new approach to drone manufacturing automation provides significant benefits, including cost reduction, increased flexibility and adaptability, and improved quality of end products through the integration of advanced technologies and management methods.*

**Key words:** automation, artificial intelligence, digital technologies, Deep Q-Learning, drone manufacturing, efficiency.

### Постановка проблеми

Сучасний світ швидко розвивається, особливо у виробництві високотехнологічної продукції, як-от дрони. Ключовою умовою розвитку цього сектора є повна автоматизація виробництва з використанням інформаційних технологій і робототехнічних систем. Гнучкі технології дозволяють ефективно адаптувати виробничі процеси для удосконалення існуючих моделей та створення нових.

Автоматизація проектування, виготовлення, складання та управління виробничими процесами підвищує ефективність і якість продукції. Інноваційні технології та моделі промислової автоматизації зменшують фінансові витрати, кількість відходів, покращують безпеку та надійність продукції.

Сучасні методи автоматизації, такі як використання традиційних роботизованих систем і автоматизованих конвеєрів, часто стикаються з обмеженнями в умовах динамічних змін та складності виробничих процесів. Сучасний підхід до автоматизації вимагає інтеграції новітніх технологій, таких як штучний інтелект (ШІ), машинне навчання, і гнучкі виробничі системи, щоб забезпечити адаптивність і підвищити ефективність виробництва дронів.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

В сучасному світі інформаційні технології вже не просто відображаються у виробництві – вони трансформують його. Інтелектуальне виробництво стає ключовим чинником інтеграції інформаційних технологій з традиційними виробничими галузями. Впровадження промислових роботів на заводах може значно підвищити інтенсивність виробництва, що має особливе значення у серійному та масовому виробництві, таких галузях як автомобільна, металообробна, пластмасова, електронна, електрична та хімічна промисловості.

Інтелектуальне виробництво сприяє інтеграції інформаційних технологій з традиційними виробничими галузями. Впровадження промислових роботів може значно підвищити інтенсивність виробництва. Роботи все частіше використовуються для виконання складних завдань, таких як складання, шліфування, зварювання та пакування, і їх застосування продовжує розширюватися, особливо у серійному та масовому виробництві (автомобільна, металообробна, пластмасова, електронна, електрична та хімічна промисловості).

Для того, щоб сучасне виробництво стало більш гнучким, ефективним, безпечним, надійним та конкурентоспроможним, доцільно застосовувати ефективні моделі компонентно-базових систем промислової автоматизації, які базуються на використанні окремих компонентів (датчиків, контролерів, роботів, мереж). Ці компоненти можуть бути самостійними, але здатні ефективно взаємодіяти між собою за допомогою сучасних мережевих технологій.

Штучний інтелект вже активно впроваджується в покращення виробництва дронів, забезпечуючи значні переваги у вигляді підвищення ефективності, якості і надійності продукції. Ось деякі приклади:

**Оптимізація конструкції:** Використання алгоритмів машинного навчання для генеративного проектування дозволяє автоматично створювати і оцінювати різні варіанти конструкцій дронів. Це сприяє покращенню аеродинамічних характеристик, зменшенню ваги і підвищенню ефективності польоту.

**Проактивне, прогнозне обслуговування:** Системи на основі штучного інтелекту можуть аналізувати великі обсяги даних з сенсорів та прогнозувати час виникнення несправностей чи потребу в технічному обслуговуванні. Це дозволяє планувати ремонти заздалегідь і уникати непередбачених зупинок у виробництві дронів. ШІ обробляє дані вібрації, тепловізійні дані та аналіз оливи для оцінки стану обладнання. Такий підхід також допомагає точно забезпечувати запасні частини та прогнозувати простой для планування виробництва [1].

**Контроль якості:** Використання систем машинного навчання для візуального контролю дозволяє автоматично виявляти дефекти на виробничих лініях. Це значно підвищує якість продукції, зменшує відхилення від стандартів і забезпечує надійність готових дронів.

**Автономний політ:** Розробка алгоритмів штучного інтелекту для автономного польоту дронів дозволяє їм самостійно навігувати, уникати перешкод, оптимізувати маршрути та реагувати на зміни у середовищі. Це робить їх більш ефективними у різних умовах експлуатації.

**Безпечні, продуктивні та ефективні операції:** Виробники використовують колаборативних роботів (коботів) разом із людьми на виробничих лініях. Ці коботи працюють безпечно, виконуючи завдання, такі як підбір

деталей, експлуатація машин і проведення контролю якості. ШІ, керований машинним баченням, відіграє ключову роль у забезпеченні цієї співпраці [1].

**Інтелектуальні, автономні ланцюги постачання:** ШІ, машинне навчання (ML) і аналітика великих даних дозволяють виробникам досягати автономного планування. Це безперервне, повністю автоматизоване планування забезпечує продуктивність ланцюга постачання навіть у нестабільних умовах з мінімальним людським контролем. Агенти ШІ можуть розкласти складні виробничі лінії, оптимізуючи пропускну здатність та мінімізуючи витрати на переналагодження [1].

**Оптимізація виробничої лінії:** Алгоритми ШІ оптимізують виробничі лінії, підвищуючи ефективність і зменшуючи відходи. Ці алгоритми враховують такі фактори, як темпи виробництва, доступність матеріалів і графіки працівників для спрощення операцій [1].

**Забезпечення якості:** Системи контролю якості на основі ШІ виявляють дефекти, забезпечуючи постійну якість продукції. Машинне бачення та алгоритми глибокого навчання виявляють недоліки в режимі реального часу, зменшуючи необхідність у переробці та підвищуючи задоволеність клієнтів [1].

**Розробка нових продуктів:** ШІ допомагає в проектуванні та прототипуванні нових продуктів. Алгоритми генеративного дизайну досліджують безліч варіантів дизайну, оптимізуючи їх для продуктивності, вартості та можливості виробництва [1].

Компанії виробництва дронів використовують аналітику даних для вдосконалення процесів виробництва. Наприклад, DJI використовує дані з виробничих ліній для пошуку пунктів оптимізації та покращення продуктивності. Такі дані допомагають компаніям приймати обґрунтовані рішення щодо управління виробництвом [2].

Компанії, такі як DJI та Parrot, використовують алгоритми штучного інтелекту для оптимізації дизайну дронів. Це включає в себе вибір оптимальних матеріалів, конструкцій та параметрів виробництва для покращення якості та ефективності продукції [3].

Виробники дронів, такі як DJI та Parrot, використовують системи машинного бачення для автоматизованого контролю якості продукції. За допомогою цих систем вони можуть виявляти дефекти на виробничій лінії та уникати виробничих помилок, забезпечуючи високу якість своїх виробів [4].

Компанії виробництва дронів активно інвестують у навчання своїх працівників новим технологіям. Наприклад, DJI має програми навчання для співробітників з програмування, аналізу даних та використання робототехніки в виробництві. Це допомагає забезпечити наявність кваліфікованих кадрів для впровадження технологічних інновацій [5].

Дослідники з Harvard Business Review відзначають, що інтелектуальне виробництво не тільки змінює спосіб, яким ми виробляємо товари, але й відкриває перед підприємствами нові можливості для оптимізації процесів та підвищення продуктивності. Інтеграція штучного інтелекту, аналітики даних та автоматизованих систем стає ключовим фактором конкурентоспроможності [5].

Використання симуляційного моделювання з програмним забезпеченням Flexsim може стати ключовим елементом методу інтегрованого навчання для студентів інформаційно-технологічних спеціальностей. Цей метод спрямований на надання студентам практичних навичок у вирішенні завдань ефективності автоматизованих систем. Студенти отримують можливість експериментувати з різними варіантами налаштувань та параметрів систем, аналізувати результати та вплив різних стратегій на продуктивність та ефективність системи. Такий підхід дозволяє студентам краще розуміти принципи роботи автоматизованих систем та їх вплив на продуктивність виробництва [6].

#### **Формулювання мети дослідження**

Метою роботи є: Дослідити нові підходи до автоматизації виробництва дронів через інтеграцію штучного інтелекту та сучасних технологій машинного навчання. Вона акцентує увагу на потенціалі алгоритмів навчання з підкріпленням, таких як Deep Q-Learning, для оптимізації виробничих процесів у складних і динамічних середовищах. Окремо висвітлюється використання симуляційних технологій для моделювання та тестування виробничих процесів без необхідності реального втручання. Також запропоновано інноваційні методи оптимізації виробничих ліній за допомогою нейронних мереж і правил навчання, що дозволяють автоматизованим системам навчатися на власних помилках і безперервно вдосконалювати процеси.

#### **Викладення основного матеріалу дослідження**

Автоматизація виробництва дронів вже не є новим поняттям, проте інтеграція новітніх технологій, таких як штучний інтелект (ШІ) та гнучкі виробничі системи, відкриває нові горизонти для підвищення ефективності та якості продукції. У цій статті пропонується новий підхід до автоматизації, який враховує останні досягнення у сфері інформаційних технологій та робототехніки.

ШІ має потенціал кардинально змінити виробництво дронів, автоматизуючи складні завдання та забезпечуючи адаптивність виробничих ліній. Завдяки машинному навчання та аналізу великих даних, виробничі системи можуть самостійно налаштовуватися для досягнення оптимальної продуктивності. Наприклад, алгоритми ШІ здатні аналізувати дані з сенсорів у реальному часі для передбачення можливих збоїв у роботі обладнання та

автоматично налаштовувати виробничі процеси для запобігання простоїв, що в свою чергу зменшить собівартість продукції.

Автоматизація виробництва дронів базується на принципах, схожих до навчання нейронних мереж, де системи постійно вдосконалюються на основі аналізу доступних даних та оптимізації процесів. У цьому випадку автоматизація включає не тільки механізовані процеси, а й алгоритмічне навчання для кращої продуктивності.

Процес автоматизації дронів передбачає, що виробниче середовище постійно оновлюється та оптимізується з урахуванням нових параметрів, отриманих у ході роботи. Відбувається регуляція і налаштування виробничих ліній та обладнання, подібно до того, як у нейронних мережах налаштовуються вагові коефіцієнти для поліпшення результатів.

Під час автоматизації важливо дотримуватися певної послідовності: надходження вхідних даних (наприклад, специфікації деталей або параметри дронів), після чого система автоматизації коригує параметри виробництва, оптимізуючи процес. Внаслідок цього, виробниче середовище адаптується і здатне працювати з новими параметрами більш ефективно.

Система автоматизації використовує різні методи навчання для досягнення поставлених цілей. Це може бути контрольована автоматизація, де система налаштовується відповідно до чітких інструкцій (аналогічно до навчання з вчителем). Неконтрольована автоматизація, як і самонавчання, дозволяє системі самостійно визначати оптимальні шляхи для поліпшення виробничих процесів без чітких інструкцій. Змішана автоматизація поєднує ці два підходи, де частина параметрів контролюється за задалегідь визначеними правилами, а інша частина вдосконалюється за рахунок адаптивного навчання системи.

Ці методи дозволяють виробничим системам дронів бути більш гнучкими та продуктивними, забезпечуючи вищий рівень ефективності порівняно з традиційними виробничими методами.

Для автоматизації виробництва дронів сучасні правила навчання нейронних мереж можуть бути адаптовані для оптимізації процесів на різних етапах виробництва. Аналогічно до навчальних правил для нейронних мереж, автоматизовані системи можуть використовувати різні стратегії для поліпшення продуктивності та точності:

- Правило Хебба для виробництва

У виробництві дронів правило Хебба може застосовуватися для постійного вдосконалення процесів на основі взаємодії між окремими компонентами системи. Наприклад, якщо два виробничі кроки (скажімо, складання корпусу та встановлення електронних компонентів) виконуються успішно та синхронно, взаємозв'язки між цими етапами можуть бути підсилені. Це може привести до підвищення швидкості та зменшення ймовірності дефектів, оскільки системи стають більш узгодженими. Згідно з цим правилом (формула 1.1), якщо на  $k$ -тому кроці навчання два нейрони з виходами  $(x_j, y_i)$  одночасно збуджуються, то вага синаптичного з'єднання між ними збільшується, інакше вага зменшується.

$$\Delta W_{ij}(k) = r * x_j(k) * y_i(k), \quad (1)$$

де  $r$  – коефіцієнт швидкості навчання

- Правило «дельта» для калібрування виробничих процесів

У виробництві дронів правило «дельта» може використовуватися для калібрування та корекції неточностей на різних етапах виробничого процесу. Наприклад, система може аналізувати відхилення у точності деталей дрона і автоматично регулювати відповідні параметри (такі як тиск преса чи швидкість обробки) для зменшення цих відхилень. Це дозволяє знизити похибки і досягти вищої відповідності бажаним результатам.

- Правило змагання для кластеризації виробничих завдань

Метод змагання може бути використаний для оптимізації розподілу завдань між різними автоматизованими машинами на виробничій лінії. Система може змагатись за те, щоб найефективніший ресурс виконував певне завдання, наприклад, найбільш кваліфікований робот буде обиратися для складного складання. Це допомагає підвищити ефективність виробничих процесів, оскільки кожне завдання виконується тим ресурсом, який найкраще підходить для цієї роботи.

- Правило градієнтного спуску для налаштування параметрів

Правило градієнтного спуску може бути використане для поступового вдосконалення різних параметрів виробничого процесу. Наприклад, оптимізація швидкості конвеєра чи температурних режимів під час зварювання може здійснюватися шляхом пошуку мінімальних похибок у вихідних характеристиках дрона.

- Самоорганізовані карти для оптимізації розподілу ресурсів

Самоорганізовані карти можуть бути використані для адаптивного планування і кластеризації завдань на виробничій лінії. Система може автоматично групувати подібні завдання та розподіляти ресурси таким чином, щоб досягати найвищої ефективності, оптимізуючи витрати часу і ресурсів.

Застосування цих правил може зробити виробництво дронів більш гнучким, адаптивним і здатним швидко реагувати на зміни в умовах виробництва та вимогах до кінцевого продукту.

Deep Q-Learning (DQL), розроблений компанією DeepMind, став одним із найбільш значущих досягнень у галузі глибокого навчання з підкріпленням. Його унікальність полягає в поєднанні класичних методів Q-Learning із глибокими нейронними мережами, що дозволяє агентам навчатися вирішувати складні завдання у різних середовищах. У контексті автоматизації виробництва дронів, алгоритм DQL може бути використаний для оптимізації виробничих процесів, забезпечуючи динамічне реагування на непередбачувані умови, що виникають на лінії складання:

- Оптимізація виробничих процесів через навчання з підкріпленням

У виробничому середовищі, яке характеризується високим ступенем мінливості та складності, важливо навчити автоматизовані системи швидко адаптуватися до змін. Класичний Q-Learning базується на оцінці **Q-функції**, яка вимірює очікувану винагороду для кожної пари стан-дія. Це допомагає агенту визначати оптимальні дії у кожному стані. Але коли йдеться про виробничі системи дронів, які мають великий простір станів (наприклад, різні конфігурації деталей дрона, умови середовища тощо), традиційний підхід стає непрактичним через обмеження продуктивності та пам'яті.

Deep Q-Learning використовує глибокі нейронні мережі для апроксимації Q-функції, що дає можливість системам вивчати значно складніші виробничі середовища. Алгоритм навчається визначати, які дії в кожному стані виробничого процесу найефективніші для досягнення кінцевої мети, наприклад, підвищення точності складання або зменшення часу простою на лінії.

- Вирішення проблем складності в автоматизації виробництва дронів

Табличний підхід Q-Learning виявився менш ефективним для складних завдань через такі обмеження:

1. Проблеми продуктивності: Великий простір станів, що виникає у виробничих системах, особливо при роботі з багатьма параметрами дрона (наприклад, компоненти різних розмірів і форм), робить ітеративні операції надто повільними.

2. Проблема зберігання: Традиційні методи вимагають великих обсягів пам'яті для зберігання Q-таблиць, що складноє використання їх у виробничих системах.

3. Неперервний простір станів: Виробництво дронів передбачає обробку неперервних даних, таких як параметри польоту, які змінюються в залежності від дизайну. Табличний метод не може ефективно справлятися з такими ситуаціями.

Deep Q-Learning долає ці труднощі за допомогою нейронних мереж, які можуть моделювати складні залежності між станами і діями у виробничому процесі дронів.

- Використання Experience Replay для підвищення ефективності

При автоматизації складання дронів, критично важливо забезпечити стабільність та точність процесів. Алгоритм Deep Q-Learning використовує техніку Experience Replay для вирішення проблеми нестабільності при навчанні нейронних мереж. Ця техніка дозволяє повторно використовувати досвід, накопичений системою під час різних етапів виробничого процесу, що зменшує кореляцію між вибірками даних і забезпечує стабільніше навчання.

Наприклад, під час складання складних механізмів дронів, система може зустріти багато різних ситуацій, таких як несподівані відмови деталей або відхилення у точності. Завдяки Experience Replay, система зберігає минулі досвіди і використовує їх для поліпшення прийняття рішень у майбутньому, що дозволяє значно покращити ефективність виробництва.

- Використання Target Network для стабільного навчання

Щоб уникнути нестабільності в навчанні, яка виникає через постійне оновлення ваг Q-мережі під час виробничого процесу, у Deep Q-Learning використовується друга нейронна мережа, відома як Target Network. Вона допомагає забезпечити стабільність цільових значень Q протягом короткого часу, що дозволяє системі уникнути осциляцій у результатах під час оновлення ваг.

Наприклад, під час налаштування параметрів складання дрона (наприклад, калібрування сенсорів або моторів), стабільність цих параметрів є критично важливою для досягнення точної роботи дрона. Target Network дозволяє системі підтримувати стабільність під час таких налаштувань, зменшуючи ймовірність виникнення помилок через постійні зміни у моделях.

- Впровадження навчання з підкріпленням у реальні виробничі сценарії

Deep Q-Learning можна застосувати для оптимізації різних етапів автоматизації виробництва дронів. Це можуть бути такі задачі, як:

1. Розподіл завдань між роботами на виробничій лінії: навчання роботів координувати дії для швидкого і точного складання дронів.

2. Оптимізація маршруту складальних роботів: навчання ефективним маршрутам переміщення на лінії, з урахуванням перешкод і обмежень простору.

3. Управління якістю продукту: використання алгоритмів навчання для виявлення дефектів на ранніх стадіях виробництва та їх автоматичне усунення.

Використання таких підходів дозволяє досягти високої продуктивності, зменшити витрати та підвищити якість дронів, виготовлених на автоматизованих лініях.

Нова парадигма полягає у використанні симуляційного підходу для оптимізації різних стадій виробництва дронів – від дизайну компонентів до інтеграції готових систем. Симуляції дозволяють моделювати різні сценарії та тестувати реакції виробничих ліній на зміни умов без необхідності втручання в реальний процес.

Завдання автоматизації виробництва дронів вимагає моделювання фізики польоту, а також взаємодії компонентів дрону в межах складних виробничих ліній. Симуляція фізики у виробничому процесі базується на рушію PhysX від NVIDIA, який дозволяє інтегрувати фізичні моделі віртуальних дронів із виробничими середовищами.

Для реалізації цього процесу використовуються наступні елементи:

- RigidBody для моделювання динамічних властивостей дронів на різних етапах виробництва.
- Collider для визначення зіткнень під час складання та перевірки компонентів у симуляції.
- Physics Material для моделювання взаємодій під час процесу складання, таких як тертя та зчеплення, що можуть впливати на якість та стабільність кінцевого продукту.
- Joints для імітації динамічних вузлів, які дозволяють віртуальним роботам і дронам взаємодіяти з різними елементами виробничого конвеєру.

Гнучкі виробничі лінії, що складаються з модульних систем, дозволяють швидко адаптуватися до змін у вимогах ринку та виробництва. Модульні системи складаються з автономних компонентів (датчики, роботи, контролери), які можуть бути легко змінені або оновлені без значних витрат часу та ресурсів. Це забезпечує високу гнучкість та масштабованість виробництва, дозволяючи компаніям швидко реагувати на запити клієнтів та випускати нові моделі дронів.

Таблиця 1

**Сучасні системи автоматизації, що застосовуються у виробництві дронів**

Назва системи чи засобу автоматизації	Переваги у застосуванні
Системи нагляду та збору даних (SCADA)	Візуалізація процесів, моніторинг у реальному часі, автоматичний збір та аналіз даних, інтеграція з іншими системами, віддалений доступ та управління, підвищення надійності та зменшення витрат.
Розподілені системи управління (DCS)	Розподілена архітектура, висока обробка даних, гнучкість, надійність, інтеграція з іншими системами, централізоване управління.
Програмовані логічні контролери (PLC)	Програмування логіки управління обладнанням, контроль датчиків, виконання функцій для оптимізації виробництва.
Системи управління виробництвом (MES)	Відстеження та контроль процесів у реальному часі, оптимізація процесів, аналіз даних, контроль за споживанням енергоресурсів.
Системи планування ресурсів (ERP)	Інтеграція фінансів, управління запасами, планування та прогнозування виробництва.
Роботизовані виробничі системи	Підвищення продуктивності, якості, зменшення витрат, гнучкість, здатність працювати у небезпечних умовах.

Було розроблено такий підхід до реалізації Deep Q Learning алгоритму для автоматизації виробництва дронів:

1. Моделювання середовища

Для моделювання виробничого середовища можна використовувати симуляцію, яка включає всі етапи виробництва дронів. Це може бути програмне забезпечення, яке моделює фізичні процеси, або віртуальне середовище, яке імітує реальні умови.

2. Визначення станів і дій

- Стани (s):
  - o Поточний етап виробництва (наприклад, складання, тестування, упаковка).
  - o Стан компонентів (наприклад, наявність, якість).
  - o Параметри середовища (наприклад, температура, вологість).
  - o Час, що залишився до завершення виробництва.
- Дії (a):
  - o Виконання конкретних операцій (наприклад, складання компонентів, перевірка якості).
  - o Переміщення компонентів між етапами виробництва.
  - o Налаштування параметрів обладнання.

3. «Винагороди»

Винагороди визначаються на основі ефективності виконання дій, якості кінцевого продукту та витрат часу.

Наприклад:

- Позитивна винагорода за успішне складання компонентів.
- Негативна винагорода за дефекти або затримки у виробництві.
- Позитивна винагорода за економію часу та ресурсів.



4. Архітектура нейронної мережі

Для апроксимації Q-функції використовується багатошарова перцептронна мережа (MLP) з кількома прихованими шарами. Приклад архітектури:

- Вхідний шар: кількість нейронів відповідає кількості параметрів стану.
- Приховані шари: 2–3 шари з 64–128 нейронами кожен, з активацією ReLU.
- Вихідний шар: кількість нейронів відповідає кількості можливих дій.

5. Алгоритм навчання

1. **Ініціалізація:**

- o Ініціалізуються параметри нейронної мережі

$$\theta$$

і цільової мережі

$$\theta^-$$

- o Встановлюється початковий стан

$$s_0$$

2. **Вибір дії:**

- o Використовується  $\epsilon$ -жадібна стратегія для вибору дії

$$a$$

з імовірністю  $\epsilon$  вибирається випадкова дія, з імовірністю  $1-\epsilon$  – дія, яка максимізує Q-функцію.

3. **Виконання дії:**

- o Виконується дія

$$a$$

отримується винагорода

$$r$$

і новий стан

$$s$$

4. **Оновлення Q-функції:**

- o Обчислюється цільове значення:

$$y = r + \gamma \max_{a'} Q(s', a'; \theta^-).$$

- o Оновлюються параметри нейронної мережі

$$\theta$$

для мінімізації функції втрат

$$L(\theta)$$

5. **Оновлення цільової мережі:**

- o Параметри

$$\theta^-$$

оновлюються кожні N кроків для стабільності.

**Висновки**

Сучасні інноваційні підходи в автоматизації виробництва дронів передбачають використання симуляцій для навчання роботів, що займатимуться складанням дронів. Окрім традиційних методів, таких як використання роботизованих маніпуляторів і автоматизованих конвеєрів, симуляційні середовища на зразок Unity можуть бути використані для впровадження алгоритмів машинного навчання, які здатні оптимізувати виробничий процес у реальному часі.

Інтеграція нейронних мереж для навчання робочих станцій дозволяє дронам автоматично коригувати параметри під час складання, враховуючи неочікувані події чи помилки на лінії. Це створює адаптивні виробничі системи, які можуть самонавчатися на помилках та збільшувати ефективність у довгостроковій перспективі.

Одним із перспективних напрямів є використання алгоритмів навчання з підкріпленням, таких як Deep Q-Learning, для оптимізації процесів на рівні взаємодії різних елементів виробничого циклу. Це дозволяє скоротити час навчання виробничих роботів і підвищити точність складання, зменшуючи кількість дефектів і підвищуючи швидкість виробництва.

Автоматизація виробництва дронів значно вдосконалюється завдяки інтеграції новітніх технологій, таких як штучний інтелект (ШІ) та гнучкі виробничі системи. Ці технології дозволяють підвищити ефективність та

якість продукції, забезпечуючи адаптивність виробничих ліній і можливість швидкого реагування на зміни у вимогах ринку.

ШІ грає ключову роль у цій трансформації, автоматизуючи складні завдання, забезпечуючи адаптивність виробничих процесів та оптимізуючи продуктивність через машинне навчання та аналіз великих даних. Інтелектуальні системи управління, засновані на ШІ, здатні виявляти відхилення від норми, прогнозувати проблеми та автоматично коригувати роботу обладнання, що зменшує кількість браку та підвищує якість продукції.

Гнучкі виробничі лінії, що складаються з модульних систем, дозволяють швидко адаптуватися до змін, що забезпечує високу масштабованість і гнучкість виробництва. Це особливо важливо для швидкої реакції на запити клієнтів та випуск нових моделей дронів.

#### **Перспективи подальших розвідок у даному напрямі:**

- Розвиток алгоритмів ШІ та машинного навчання: Подальший розвиток алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання, включаючи вдосконалення технік навчання з підкріпленням та архітектур нейронних мереж, може значно підвищити адаптивність та ефективність автоматизованих виробничих систем. Дослідження можуть зосереджуватись на покращенні продуктивності алгоритмів, зменшенні вимог до обчислювальних ресурсів та інтеграції більш складних процесів прийняття рішень.

- Інтеграція квантових обчислень: З розвитком технологій квантових обчислень, їх застосування в автоматизації виробництва дронів може забезпечити значні переваги у вирішенні складних оптимізаційних задач та моделюванні виробничих процесів. Дослідження в цій сфері можуть зосереджуватись на розробці нових квантових алгоритмів для підвищення ефективності автоматизованих систем.

- Розробка нових сенсорних технологій: Інноваційні сенсорні технології можуть вдосконалити моніторинг та контроль за якістю виробничих процесів. Дослідження можуть зосереджуватись на створенні нових типів датчиків та систем збору даних, які забезпечують більш точні та швидкі результати.

- Удосконалення симуляційних моделей: Подальше вдосконалення симуляційних моделей для виробництва дронів, включаючи моделювання складніших фізичних явищ та взаємодій компонентів, може допомогти у створенні ще більш реалістичних умов для тестування та оптимізації процесів.

- Гнучкість та масштабованість виробничих систем: Розвиток нових підходів до проектування гнучких та масштабованих виробничих систем дозволить швидше адаптуватися до змін в ринкових вимогах і технологічних умовах.

- Застосування біонічних і біоінспірованих технологій: Дослідження в області біонічних і біоінспірованих технологій можуть привести до створення нових методів для підвищення ефективності виробництва дронів, черпаючи натхнення з природних систем і процесів.

- Екологічні аспекти та стійкість: Розробка нових підходів для зменшення екологічного впливу виробництва дронів та підвищення стійкості виробничих процесів стане важливою частиною подальших досліджень. Це може включати впровадження технологій для зменшення відходів, повторного використання матеріалів та енергоефективних рішень.

#### **Список використаної літератури**

1. AI and Robotics in Manufacturing: How Automation is Transforming the Industry. [Електронний ресурс] : [веб сайт]. Режим доступу : Information Age – Intelligence for Technology Leaders (information-age.com).

2. The Rise of AI in Manufacturing: 6 Examples of AI in Action. [Електронний ресурс] : [веб сайт]. Режим доступу : Forbes.

3. AI in Manufacturing: The Fourth Industrial Revolution. [Електронний ресурс] : [веб сайт]. Режим доступу : Emerj Artificial Intelligence Research.

4. Artificial Intelligence in Manufacturing Market – Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2021–2026) – Mordor Intelligence. [Електронний ресурс] : [веб сайт]. Режим доступу : Market Research Company – Mordor Intelligence™.

5. How AI is Revolutionizing Manufacturing – Harvard Business Review. [Електронний ресурс] : [веб сайт]. Режим доступу : Harvard Business Review – Ideas and Advice for Leaders (hbr.org).

6. Чибіряк Я.І., Баранова І.В., Ніколаєнко К.О. Метод наскрізного навчання студентів ІТ- спеціальностей імітаційному моделюванню у середовищі flexsim для пошуку резервів підвищення ефективності автоматизованих систем / Я.І. Чибіряк, І.В. Баранова, К.О. Ніколаєнко // Науковий журнал.

#### **References**

1. AI and Robotics in Manufacturing: How Automation is Transforming the Industry. [Electronic resource]: [website]. Access mode: Information Age – Intelligence for Technology Leaders (information-age.com).

2. The Rise of AI in Manufacturing: 6 Examples of AI in Action. [Electronic resource]: [website]. Access mode: Forbes.

3. AI in Manufacturing: The Fourth Industrial Revolution. [Electronic resource]: [website]. Access mode: Emerj Artificial Intelligence Research.
4. Artificial Intelligence in Manufacturing Market – Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2021–2026). [Electronic resource]: [website]. Access mode: Market Research Company – Mordor Intelligence™.
5. How AI is Revolutionizing Manufacturing. [Electronic resource]: [website]. Access mode: Harvard Business Review – Ideas and Advice for Leaders (hbr.org).
6. Chybiriak Y.I., Baranova I.V., Nikolaienko K.O. The Method of Cross-Learning for IT Students in Simulation Modeling Using FlexSim to Identify Reserves for Improving Automated Systems Efficiency / Y.I. Chybiriak, I.V. Baranova, K.O. Nikolaienko // Scientific Journal.

## УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ

UDC 519.7

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.40>

R. GRASCHT

Doctor in Technical Science, Professor,  
Professor at the Department of Technical Logistics  
University of Applied Sciences Kaiserslautern  
ORCID: 0009-0001-9911-6657

P. V. MATEICHYK

Postgraduate Student at the Department of Ecology  
and Safety of Vital Functions  
National Transport University  
ORCID: 0009-0001-5384-7964

**COMPLEX METHODOLOGY OF MANAGING THE DEVELOPMENT  
OF THE CHARGING STATION NETWORK**

*The paper examines the problem of managing the operation and development of the electric vehicle charging infrastructure. Enterprises providing electric vehicle charging services together with their operating environment form a complex hierarchical system. The multi-criteria task of adaptive control of such a system must be considered in different aspects depending on the goals of control at different levels of the system hierarchy. The formation of scientifically based typical and promising charging infrastructure solutions requires the complex application of optimization models and algorithms, taking into account the coverage of the territory by the system of charging stations, the scale of the enterprise that provides services to the customers of the system, as well as the interests and needs of all target groups affected by the system. Therefore, the purpose of this study is to form a comprehensive method of system management of the development of charging infrastructure for electric vehicles, which includes the specified models and algorithms. To solve the set goal, a set of target indicators was formed for various variants of the hierarchical structure of the system. The target indicators are based on models of energy efficiency of electric vehicles, models of the theory of mass service systems and models of car service efficiency. A morphological model of the system containing four functional elements was built: enterprise, electric vehicle, transport flow and environment. An algorithm has been developed that implements the method of system management of the charging infrastructure and takes into account the interests of three target groups: customers, entrepreneurs and the social environment. The proposed methodology can be used in the algorithms of smart management systems of the network of charging stations and modules of intelligent transport systems to evaluate the impact of the charging infrastructure on the performance indicators of road transport.*

**Key words:** electric vehicle, charging infrastructure, multi-criteria task, set of target indicators, morphological matrix.

P. ГРАШТ

доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри технічної логістики  
Університет прикладних наук Кайзерслаутерна  
ORCID: 0009-0001-9911-6657

П. В. МАТЕЙЧИК

аспірант кафедри екології  
та технологій захисту навколишнього середовища  
Національний транспортний університет  
ORCID: 0009-0001-5384-7964

**КОМПЛЕКСНА МЕТОДИКА КЕРУВАННЯ РОЗВИТКОМ МЕРЕЖІ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ**

*В роботі досліджується проблема керування роботою та розвитком зарядної інфраструктури електромобілів. Підприємства, що надають послуги зарядки електромобілів, разом із середовищем їх функціонування утворюють складну ієрархічну систему. Багатокритеріальну задачу адаптивного керування такою системою необхідно розглядати в різних аспектах залежно від цілей керування на різних рівнях системної ієрархії. Формування науково обґрунтованих типових та перспективних рішень зарядної інфраструктури вимагає комплексного застосування оптимізаційних моделей та алгоритмів із врахуванням покриття території системою зарядних станцій, масштабу підприємства, яке надає послуги клієнтам системи, а також інтересів та потреб всіх*

цільових груп, на які впливає система. Тому метою даного дослідження є формування комплексної методики системного управління розвитком зарядною інфраструктурою для електромобілів, яка охоплює зазначені моделі та алгоритми. Для вирішення поставленої мети сформовано комплекс цільових показників для різних варіантів ієрархічної структури системи. Цільові показники базуються на моделях енергетичної ефективності електромобілів, моделях теорії систем масового обслуговування та моделях ефективності автосервісу. Побудовано морфологічну модель системи, що містить чотири функціональні елементи: підприємство, електромобіль, транспортний потік та середовище. Розроблено алгоритм, який реалізує методику системного керування зарядною інфраструктурою та враховує інтереси трьох цільових груп: клієнтів, підприємців та соціального середовища. Запропоновану методику можна застосовувати в алгоритмах розумних систем керування мережею зарядних станцій та модулів інтелектуальних транспортних систем для оцінювання впливу зарядної інфраструктури на показники ефективності автомобільного транспорту.

**Ключові слова:** електромобіль, зарядна інфраструктура, багатокритеріальна задача, комплекс цільових показників, морфологічна матриця.

### Statement of the problem

Currently, there is a growing popularity of electric vehicles (EVs) as a sustainable and efficient alternative to traditional vehicles with internal combustion engines. The positive attitude of consumers of transport services towards electric vehicles is due to the government's policy on public awareness of global energy and environmental problems. Electric vehicles are generally more energy efficient than gasoline and diesel vehicles, converting a higher percentage of electricity from the grid into power at the wheels. Electric vehicles produce zero emissions, which helps reduce air pollution, however, the overall environmental impact depends on the source of electricity used for charging. With rising fuel prices, owners are also attracted by the economic efficiency of electric cars. Compared to traditional vehicles, they have lower operating costs and maintenance requirements due to fewer moving parts, no need for oil changes, and less brake wear due to regenerative braking. In addition, the instantaneous torque provides quick acceleration and controllability of the electric vehicle. Many electric vehicle models are equipped with advanced technological features, including regenerative braking systems, intelligent energy management systems and driver assistance systems.

Despite the mentioned advantages of using electric vehicles, there are problems related to the limited infrastructure of charging stations in certain regions, which can prevent their rapid implementation. In order to create typical charging infrastructure solutions for electric vehicles at the level of the charging station and network of charging stations, it is necessary to solve the system problems of determining their rational structure and parameters.

Enterprises providing electric vehicle charging services together with their operating environment form a complex hierarchical system. The multi-criteria task of adaptive control of such a system must be considered in different aspects depending on the control objectives. It is advisable to organize the hierarchy of subsystems and elements of the studied system according to the territorial distribution or scale of the enterprise. In addition, the choice of criteria for the effectiveness of its operation depends on the needs of customers of charging stations and other target groups seeking to realize their economic and social goals. Only the complex application of models and algorithms taking into account the above-mentioned factors will ensure the formation of scientifically based typical and promising charging infrastructure solutions for the development of electric mobility of the population and obtaining the corresponding positive effects.

### Analysis of recent research and publications

To satisfy customers and owners of charging infrastructure facilities, as well as to reduce its impact on the environment, it is necessary to rationally organize the work of these facilities with the possibility of their further development. The process of managing the charging infrastructure includes monitoring the operation of charging stations with the verification of defined activity indicators: for different target groups [1-3], at different levels of business decomposition [4], at different levels of management [5]. But these groups of indicators are not related to each other and are not integrated into the general methodology. In work [4], a charging station is considered as a special case of a car service enterprise, the evaluation method proposed in [4] does not take into account the specifics of charging stations as infrastructure objects. The structure of models for evaluating the efficiency of an enterprise in work [5] is considered only from the point of view of business success and has only an economic context. Some scientists have attempted to determine the system's efficiency criteria, taking into account the needs of both business and system customers [1, 4, 6], adding to the system indicators the customer loyalty coefficient within the customer radius. However, there is no formalization of the calculation of the client radius in the cited works. Scientists offer only subjective constant estimates of this parameter (5 km) [6-7], which are difficult to adapt to other studies. And the customer loyalty ratio is used as a basic partial parameter to determine the main indicator of system efficiency. The social impact of the charging infrastructure is determined in work [8] by the prospective environmental effect and the shortage of electrical energy in the power system at the location at the predicted values of the demand for charging. Optimization of the network of charging stations by territorial distribution is devoted to articles [9-17].

The analysis of recent studies showed that, despite the urgency of the problem of optimizing the charging infrastructure, there are currently no system solutions for it.

**Formulation of the purpose of research**

The purpose of this study is to develop a comprehensive method of system management of the charging infrastructure for electric vehicles. To achieve this purpose, the following tasks must be solved:

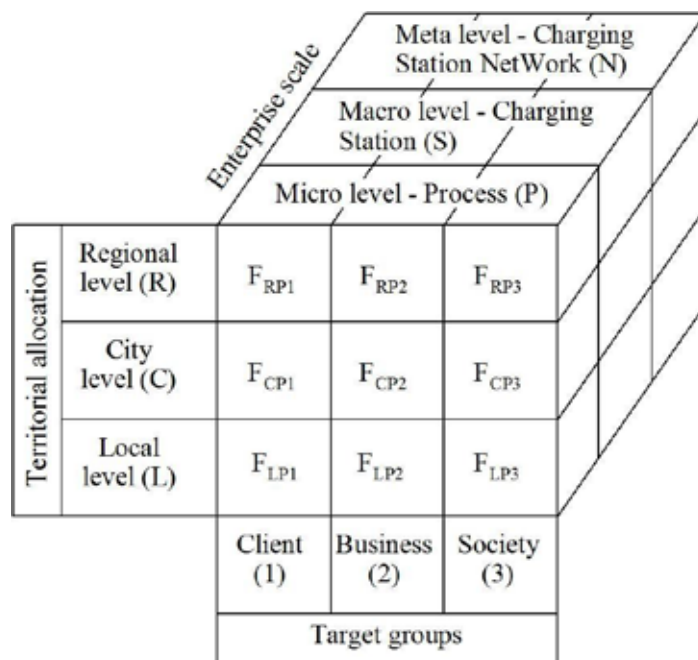
- determination of the structure of the system of charging stations;
- determination of a set of target indicators for the task of optimization of the charging station system;
- development of a comprehensive methodology for managing the development of the charging station system.

**Presentation of the main research material**

The hierarchical structure of the system of charging stations can be determined depending on the selected type of decomposition. The regional system consists of urban and non-urban subsystems, which in turn are formed from local subsystems of a lower level. Based on the results of [4], it is possible to set the depth of system decomposition from the network of charging stations to the level of one charging station or a separate charging/discharging process.

Taking into account the designations that were introduced in work [1], a set of target performance indicators is proposed in the task of rational management of the system of charging stations, taking into account various representations of the system structure (fig. 1). To simplify the perception of the specified complex in fig. 1 shows only urban subsystems of the average level of territorial distribution.

Each target indicator is a point in the three-dimensional space "Territorial allocation – Enterprise scale – Target groups" and represents a target function in the task of optimizing the operation of the charging station system.



**Fig. 1. The set of target indicators of the operation and development of the charging station system**

The indicators of the upper levels of the territorial distribution of the system will be determined by convolution of the indicators of the lower level. The target efficiency indicators for different decompositions of the network of charging stations can be approximated by the convolution of the target indicators of the corresponding subsystems. However, at each level of decomposition, it is possible to set additional properties of the system. The performance indicator for the Z-th target group (client, entrepreneur (business), society) is generally determined as follows:

$$F_{x^i y^j z} = \sum_1^N \sum_1^M F_{x^{i-1} y^{j-1} z}, \tag{1}$$

де where  $F_{x^i y^j z}$  is the target indicator at the  $i$ -th territorial level and the  $j$ -th level of system scaling;  $N$  is the number of subsystems at the  $(i-1)$ -th territorial level;  $M$  is the number of subsystems for the  $(j-1)$  scale of the enterprise providing charging infrastructure services.

Models and algorithms of target indicators that take into account customer and business requirements are based on car service efficiency models, models of the theory of mass service systems and are described by the authors in works [1, 3]. The target indicator, which takes into account the requirements of the social environment, is proposed to be determined by the following expression:

$$F_{X^{i,j}/Z} = \alpha I_{e,e} \times \beta I_{e,i} \times \gamma I_s, \tag{2}$$

where  $F_{X^{i,j}/Z}$  is the target function of social efficiency at the  $i$ -th territorial level and the  $j$ -th level of system scaling;  $I_{e,e}$ ,  $I_{e,i}$ ,  $I_s$  is indicators of energy efficiency, environmental impact and safety of the charging infrastructure, respectively;  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  are the weighting coefficients of the corresponding partial indicators of social efficiency.

In work [1], only a consolidated algorithm for optimizing the system of charging stations based on social efficiency indicators is given.

In order to assess the impact of the essential properties of the charging station system on its social efficiency indicators and determine the weighting factors of these indicators, it is necessary to build appropriate regression models. The basis for such models are the results of morphological analysis of the system. The system of charging stations consists of four functional elements: "Enterprise" that provides charging infrastructure services; "Electric vehicle (EV)"; "Transport flow" around the charging infrastructure; "Environment". Morphological characteristics of the functional elements "Transport flow" and "Environment", as well as their implementation options are presented in the paper [18]. The morphological structure of the functional elements "Car service enterprise" and "Vehicle", proposed in works [4, 18], does not take into account the specifics of the functioning of the charging infrastructure. The functional elements "Enterprise" and "EV" defined on their basis were introduced into the morphological model of the charging station system. The corresponding fragment of the developed morphological matrix of the system is shown in fig. 2.

Enterprise				Electric vehicle					
1. Number of charge points	2. Charging speed	3. Connectors types	4. Power Output Level	5. Digitalization level	6. Vehicle category	7. Vehicle age, years	8. Technology level	9. Battery capacity, kWh	10. Range, km
1.1. 1-2	2.1. Level 1 Charging	3.1. Type 1 J1772	4.1. Low	5.1. Very low	6.1. M1	7.1. Up to 5	8.1. Very low	9.1. 20-30	10.1. Up to 200
1.2. 3-4		3.2. Type 2 Mennekes						9.2. 30-40	
1.3. 5-6	2.2. Level 2 Charging	3.3. Type 1 CCS Combo 1	4.2. Middle	5.2. Low	6.2. M2	7.2. 5-10	8.2. Low	9.3. 40-50	10.2. 200-300
1.4. 7-8		3.4. Type 2 CCS Combo 2						9.4. 50-60	
1.5. 9-10	2.3. DC Fast Charging	3.5. CHAdeMO	4.3. High	5.3. Middle	6.3. M3	7.3. 10-15	8.3. Middle	9.5. 60-70	10.3. 300-400
1.6. >10		3.6. GB/T						9.6. 70-80	
	2.4. Combined speed	3.7. Tesla Super-charger	4.3. High	5.4. High	6.4. N1	7.4. 15-20	8.4. High	9.7. 80-90	10.4. 400-500
		3.8. Combined charging						9.8. More than 90	
				5.5. Very high	6.5. N2	7.5. More than 20	8.5. Very high	9.9. More than 90	10.6. More than 600

Fig. 2. Attributes and options for implementation of functional elements "Enterprise" and "Electric vehicle"

The digitization level of the charging station depends on the availability of various payment methods (credit/debit cards, mobile applications) and subscription services, user interface; possibilities of real-time monitoring, conducting remote diagnostics; the presence of intelligent functions (planning, load management and integration with home energy systems). The technology level is determined by technological functions: connectivity options, driver-assistance systems, smart energy management systems, and others.

The morphological model and experimental values of the target indicator of social efficiency are the basis for determining its model values for the purpose of evaluation or forecasting. Experimental values of the partial energy efficiency indicator  $I_{e,e}$  can be obtained by "white box" models based on the models used in [8, 19]. The environmental impact indicator  $I_{e,i}$  takes into account the presence of renewable energy sources (such as solar panels) to power the charging process, which contributes to the sustainable development of the region. It is advisable to determine the social security indicator  $I_s$  based on the principles stated in [20]. In addition, charging stations must provide safety features such as overcurrent protection, ground fault protection, and emergency shutdown mechanisms.

Performance indicators for the three target groups are not independent and require consistency in the system management process. The described results made it possible to form a complex methodology for managing the development of the charging station system, the algorithm of which is presented in fig. 3.

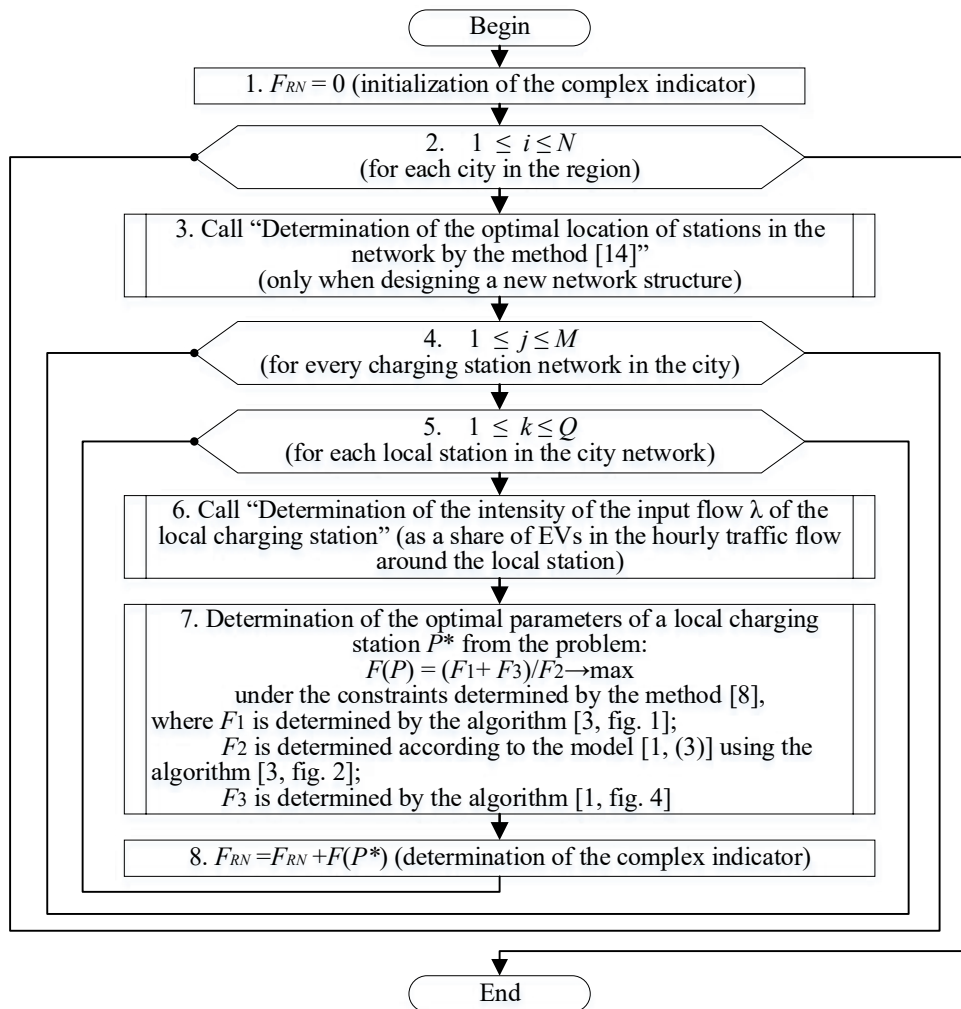


Fig. 3. System management algorithm for charging infrastructure development

### Conclusions

Based on the analysis of the latest research on the management of the charging infrastructure, a set of target performance indicators of the charging station system and its morphological model, consisting of four functional elements: enterprise, electric vehicle, transport flow and environment, have been developed. The specified morphological model and set of indicators are scientifically based, as they are based on adequate models of the energy efficiency of electric vehicles, models of the theory of mass service systems, and models of the efficiency of a car service. The proposed comprehensive methodology for managing the development of the charging infrastructure combines three different options for presenting the system, which makes it possible to take into account the maximum number of factors that affect its efficiency. The proposed methodology can be used in the algorithms of smart management systems of the network of charging stations and modules of intelligent transport systems to assess the impact of the charging infrastructure on the operational efficiency of electric transport.

### Bibliography

1. Smieszek M., Kostian N., Khrutba V., Mateichyk P., Mosciszewski J. A Multi-Level Approach to the Target Development of the Electric Vehicle Charging Stations Network. *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 74. P. 1187-1194. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.260> (date of access: 10.09.2024).
2. Ren H., Zhang A., Wang F., Yan X., Li Y., Duić N., Shafie-khah M., Catalao J.P. Optimal scheduling of an EV aggregator for demand response considering triple level benefits of three-parties. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2021. Vol. 125. 106447. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106447> (date of access: 10.09.2024).



3. Kostian N., Smieszek M., Mateichyk P. Coordination of optimisation targets at different levels of charging infrastructure development management. *Research Journal*. 2023. Vol. 30, no. 4 – part II. P. 153-162. URL: <https://doi.org/10.7862/rz.2023.hss.69> (date of access: 10.09.2024).
4. Tarandushka L., Mateichyk V., Kostian N., Tarandushka I., Rud M. Assessing the quality level of technological processes at car service enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 2, no. 3 (104). P. 58-75. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.200332> (date of access: 10.09.2024).
5. Андрусенко С.І., Бугайчук О.С. Моделювання бізнес-процесів підприємства автосервісу : монографія. К. : Кафедра, 2014. 328 с.
6. Марков О.Д., Ковальов А.В., Скиба А.П., Приз О.О. Оптимізація виробничої структури автосервісу. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. К. : НТУ, 2016. Вип. 1 (34). С. 247-254.
7. Марков О.Д., Гульчак О.Д., Точигін М.О. Логістика в системах автосервісу. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2022. № 9. С. 23-32. URL: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-9> (дата звернення: 14.09.2024).
8. Йовченко А.В. Дослідження можливості енергосистеми України в забезпеченні обслуговування парку електромобілів. *Вісник ХНТУ*. 2024. № 2(89). С. 27-31. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.3> (дата звернення: 14.09.2024).
9. Любий Є.В., Ларін Д.О. Підхід щодо формування мережі зарядних станцій електромобілів у напрямку Харків-Бердянськ. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2020. Вип. 2(60), С. 44-50. URL: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.2.044> (дата звернення: 14.09.2024).
10. Zhenzhao Li. Research on the distribution of electric vehicle charging station. *4th international conference on energy science and applied technology*, AIP Conference Proceedings, Chongqing City, China, 29 January 2019. Vol. 2066(1). 020021. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5089063> (date of access: 15.09.2024).
11. Anbang Zuo. Prediction and Distribution of Ev Charging Stations. *4th international conference on energy science and applied technology*, AIP Conference Proceedings, Chongqing City, China, 29 January 2019. Vol. 2066(1). 020048. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5089090> (date of access: 15.09.2024).
12. Shengcan Yu. The planning system of charging network. *4th international conference on energy science and applied technology*, AIP Conference Proceedings, Chongqing City, China, 29 January 2019. Vol. 2066(1), 020041. URL: <https://doi.org/10.1063/1.5089083> (date of access: 15.09.2024).
13. Gavranovic H., Barut A., Ertek G., et al. Optimizing the Electric Charge Station Network of ESARJ. *Procedia Computer Science*. 2014. Vol. 31, P. 15-21. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.240> (date of access: 15.09.2024).
14. Тарандушка Л.А., Костян Н.Л., Тарандушка І.П., Курко С.С., Клімов Е.С., Мельниченко М.В. Методика визначення та розташування оптимальної кількості зарядних станцій для електротранспорту в населеному пункті. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. Кропивницький : ЦНТУ*, 2022. Вип. 6(37). – Ч. 2. С. 57-67. URL: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6\(37\).2.57-67](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).2.57-67) (дата звернення: 15.09.2024).
15. Thingva A., Andersen P.B., Unterluggauer T., Træholt C., Marinelli M. Electrification of personal vehicle travels in cities – Quantifying the public charging demand. *eTransportation*. 2021. Vol. 9. 100125. URL: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2021.100125> (date of access: 15.09.2024).
16. Unterluggauer T., Rich J., Andersen P.B., Hashemi S. Electric vehicle charging infrastructure planning for integrated transportation and power distribution networks: A review. *eTransportation*. 2022. Vol. 12. 100163. URL: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100163> (date of access: 15.09.2024).
17. Hisatomo Hanabusa, Ryota Horiguchi. A Study of the Analytical Method for the Location. Planning of Charging Stations for Electric Vehicles. *International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems. KES 2011: Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems / Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2011. P. 596-605. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-23854-3\\_63](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23854-3_63) (date of access: 15.09.2024).
18. Smieszek M., Kostian N., Mateichyk V., Mosciszewski J., Tarandushka L. Determination of the Model Basis for Assessing the Vehicle Energy Efficiency in Urban Traffic. *Energies*. 2021. Vol. 14(24), 8538. URL: <https://doi.org/10.3390/en14248538> (date of access: 15.09.2024).
19. Rigas E.S., Ramchurn S.D., Bassiliades N. Algorithms for electric vehicle scheduling in large-scale mobility-on-demand schemes. *Artificial Intelligence*. 2018. Vol. 262 P. 248-278. URL: <https://doi.org/10.1016/j.artint.2018.06.006> (date of access: 15.09.2024).
20. Paramud Y., Rak T., Torskyi M. Principles of monitoring and control of the charging stations network for electric vehicles. *CSN*. 2020. Vol. 2, no. 1. P. 59-67. URL: <https://doi.org/10.23939/csn2020.01.059> (date of access: 15.09.2024).

### References

1. Smieszek, M., Kostian, N., Khrutba, V., Mateichyk, P., Mosciszewski, J. (2023) A Multi-Level Approach to the Target Development of the Electric Vehicle Charging Stations Network. *Transportation Research Procedia*, 74. pp. 1187–1194. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.260>

2. Ren H., Zhang A., Wang F., Yan X., Li Y., Duic N., Shafie-khah M., Catalao J.P. (2021) Optimal scheduling of an EV aggregator for demand response considering triple level benefits of three-parties. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 125, 106447. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106447>
3. Kostian N., Smieszek M., Mateichyk P. (2023) Coordination of optimisation targets at different levels of charging infrastructure development management. *Research Journal*, 30, No. 4, part II, pp. 153-162. <https://doi.org/10.7862/rz.2023.hss.69>
4. Tarandushka L., Mateichyk V., Kostian N., Tarandushka I., Rud M. (2020) Assessing the quality level of technological processes at car service enterprises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2, pp. 58–75, <https://doi.org/15587/1729-4061.2020.200332>
5. Andrusenko S. I., Buhaichuk O. S. (2014) Modeliuvannia biznes–protsesiv pidpriemstva avtoservisu: monohrafiia [Simulation of Business Processes at autoservice enterprises: Monograph]. K.: Kafedra, 328 p. [in Ukrainian].
6. Markov O.D., Kovalev A.V., Skyba A.P., Pryz O.O. (2016) Optymizatsiia vyrobnychoi struktury avtoservisu. [Optimization of industrial structure Car]. *Visnyk National Transport University. Scientific and Technical Collection*, Kyiv: National Transport University, Issue 1 (34). pp. 247-254. [in Ukrainian].
7. Markov O.D., Hulchak O.D., Tochyhin M.O. (2022) Lohistyka v systemakh avtoservisu. [Logistics in car service systems]. *International scientific journal «Internauka»*, № 9, pp. 23-32. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2022-9>
8. Yovchenko A.V. (2024) Doslidzhennia mozhlyvosti enerhosystemy Ukrainy v zabezpechenni obsluhovuvannia parku elektromobiliv. [Study of the possibility of the energy system of Ukraine in providing service to the fleet of electric vehicles]. *Visnyk of Kherson National Technical University*, № 2(89), pp. 27-31. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.3>
9. Liubiyi, Ye., Larin, D. (2020) Pidkhid shchodo formuvannia merezhi zaryadnykh stantsii elektromobiliv u napriamku Kharkiv-Berdiansk. [An Approach to Forming of Electromobiles Charging Stations Network in the Kharkiv-Berdiansk Direction]. *Control, Navigation and Communication Systems*, 2(60), pp. 44-50. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.2.044>
10. Zhenzhao Li. (2019) Research on the distribution of electric vehicle charging station. 4th international conference on energy science and applied technology. Chongqing City, China, *AIP Conference Proceedings*, 2066, 020021. <https://doi.org/10.1063/1.5089063>
11. Anbang Zuo. (2019) Prediction and Distribution of Ev Charging Stations. 4th international conference on energy science and applied technology. Chongqing City, China, *AIP Conference Proceedings*, 2066, 020048. <https://doi.org/10.1063/1.5089090>
12. Shengcan Yu. (2019) The planning system of charging network. 4th international conference on energy science and applied technology. Chongqing City, China, *AIP Conference Proceedings*, 2066, 020041. <https://doi.org/10.1063/1.5089083>
13. Gavranovic H., Barut A., Ertek G., et al. (2014) Optimizing the Electric Charge Station Network of ESARJ. *Procedia Computer Science*, 31, pp. 15-21. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.05.240>
14. Tarandushka L., Kostian N., Tarandushka I., Kurko S., Klimov E., Melnychenko M. (2022) Metodyka vyznachennia ta roztashuvannia optymalnoi kilkosti zaryadnykh stantsii dlia elektrotransportu v naselenomu punkti. [Method of Determining and Locating the Optimal Number of Charging Stations for Electric Transportation in Settlement]. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, Kropyvnytskyi: Central Ukrainian National Technical University, Issue 6(37), part II, pp. 57-67. [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6\(37\).2.57-67](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).2.57-67)
15. Thingvad A., Andersen P.B., Unterluggauer T., Træholt C., Marinelli M. (2021) Electrification of personal vehicle travels in cities – Quantifying the public charging demand. *eTransportation*, Volume 9, 100125, <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2021.100125>
16. Unterluggauer T., Rich J., Andersen P.B., Hashemi S. (2022) Electric vehicle charging infrastructure planning for integrated transportation and power distribution networks: A review. *eTransportation*, Volume 12, 100163, <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100163>
17. Hisatomo Hanabusa, Ryota Horiguchi. (2011) A Study of the Analytical Method for the Location. Planning of Charging Stations for Electric Vehicles. International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems. KES 2011: Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems, 596–605. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-23854-3\\_63](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23854-3_63)
18. Smieszek M., Kostian N., Mateichyk V., Mosciszewski J., Tarandushka L. (2021) Determination of the Model Basis for Assessing the Vehicle Energy Efficiency in Urban Traffic. *Energies*, 14(24), 8538. <https://doi.org/10.3390/en14248538>
19. Rigas E.S., Ramchurn S.D., Bassiliades N. (2018) Algorithms for electric vehicle scheduling in large-scale mobility-on-demand schemes. *Artificial Intelligence*, 262, pp. 248-278. <https://doi.org/10.1016/j.artint.2018.06.006>
20. Paramud Y., Rak T., Torskyi M. (2020) Principles of monitoring and control of the charging stations network for electric vehicles. *CSN*, Volume 2, Number 1, pp. 59-67. <https://doi.org/10.23939/csn2020.01.059>

О. В. КОКОРЄВА

кандидат економічних наук, доцент,  
доцент кафедри менеджменту, маркетингу і туризму  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0001-9918-2278

А. І. МІРОНОВ

аспірант кафедри менеджменту, маркетингу і туризму  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0009-0002-8500-3341

## РОЗРОБКА ПРОПОЗИЦІЙ ЩОДО КОРПОРАТИЗАЦІЇ ОБОРОННИХ ПІДПРИЄМСТВ

*У даній роботі розглянуто проблему розвитку оборонно-промислового комплексу України (ОПК), яка полягає не лише в недостатньому фінансуванні, але й у методологічних прогалинах в управлінні та реалізації оборонної політики. Аналіз останніх досліджень вказує на нагальність корпоратизації оборонних підприємств, що здатна підвищити їх ефективність та конкурентоспроможність. Автор пропонує системний підхід до реформування, акцентуючи на важливості інтеграції сучасних управлінських та економічних практик для подолання наявних проблем та досягнення самодостатності сектора.*

*Наголошено, що в оборонно-промисловій сфері необхідно знайти інші дієві фактори, які спроможні з одного боку, розв'язати наявні проблеми ринкового облаштування діяльності суб'єктів господарювання і безповоротно поставити її на ринкові рейки, а з іншого боку, створити незаперечні передумови для формування організаційної структури вітчизняного оборонно-промислового комплексу та системи державного управління ним, що відповідають ринковим принципам. Для врегулювання суперечностей і створення належних умов для реформування оборонно-промислового комплексу запропоновано деякі зміни до чинних законодавчих актів, що стосуються виключно підприємств ОПК за трьома сценаріями, проаналізованої основні їх переваги та недоліки.*

*Запропоновано сформувати принципово нову організаційну структуру вітчизняного оборонно-промислового комплексу та систему державного управління ним, що вирішальним чином стане можливим за рахунок переходу оборонних підприємств на акціонерну організаційно-правову форму.*

**Ключові слова:** оборонні підприємства, оборонний комплекс України, корпоратизація оборонних підприємств, конкурентоспроможність оборонних підприємств, управління підприємствами оборонно-промислового комплексу, реформування організаційної структури оборонно-промислового комплексу.

O. V. KOKORIEVA

PhD in Economics, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Management, Marketing and Tourism  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0001-9918-2278

A. I. MYRONOV

Postgraduate Student at the Department of Management, Marketing and Tourism  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0009-0002-8500-3341

## DEVELOPMENT OF PROPOSALS REGARDING THE CORPORATION OF DEFENSE ENTERPRISES

*In this work, the problem of developing Ukraine's defense industry complex (DIC) is examined, which is not only related to insufficient funding but also to methodological gaps in managing and implementing defense policy. The analysis of recent studies indicates the urgent need for the corporatization of defense enterprises, which could enhance their efficiency and competitiveness. The author proposes a systematic approach to reform, emphasizing the importance of integrating modern management and economic practices to overcome existing challenges and achieve the self-sufficiency of the sector.*

*It is highlighted that in the defense industry, it is essential to find other effective factors that can, on one hand, resolve the existing issues of market organization for economic entities and irrevocably set it on market tracks, and on the other hand, create undeniable preconditions for forming the organizational structure of the domestic defense industry complex and the system of state management that align with market principles. To address contradictions and create appropriate conditions for reforming the defense industry complex, some amendments to existing legislation regarding*

DIC enterprises are proposed based on three scenarios, analyzing their main advantages and disadvantages.

It is suggested to establish a fundamentally new organizational structure for the domestic defense industry complex and a system of state management, which can be decisively achieved by transitioning defense enterprises to a joint-stock organizational and legal form.

**Key words:** defense enterprises, defense complex of Ukraine, corporatization of defense enterprises, competitiveness of defense enterprises, management of defense industry enterprises, reforming the organizational structure of the defense industry complex.

### Постановка проблеми

Проблема розвитку оборонно-промислового комплексу України (ОПК) досить довго розглядалася через призму недостатності коштів, що виділялися державою на створення, модернізацію, виготовлення і закупівлю озброєння та військової техніки, однак збільшення фінансування у 2015–2017 роках не призвело до очікуваних результатів та зростання виробництва. Тому можна зробити припущення, що дана проблематика має більш глибокі коріння, які в однаковій мірі визначаються існуючими прогалинами у методології, формах і методах формування та реалізації як військово-технічної, так і оборонно-промислової політики.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останніми роками питання корпоратизації оборонних підприємств України набуває все більшої актуальності в умовах глобальних викликів безпеки та економічної нестабільності. Аналіз публікацій свідчить про зростаючу увагу до даної теми в наукових колах та серед практиків.

Зокрема, у дослідженнях І.І. Оцабрик [1] визначено ключові проблеми реформування оборонно-промислового комплексу України. Досліджено результати діяльності державного концерну «Укроборонпром» протягом 2014–2016 рр. Вивчено особливості та відмінності від інших галузей та винесено пропозиції щодо плану та наслідків його реформування.

У публікації І.М. Звонко [2] розглядається низка причини невдалої конверсії ОПК після 1991 року, яка полягала в переорієнтації діяльності оборонних підприємств і науково-дослідних інститутів на виробництво цивільної продукції. Розглянуто кілька спроб створити ефективну систему управління оборонно-промисловим комплексом шляхом створення Державного комітету України по оборонній промисловості і машинобудуванню, а згодом Міністерства машинобудування, військово-промислового комплексу та конверсії, але доведено, що ці спроби не дали результату.

Отже, результати останніх досліджень свідчать про багатогранність підходів до корпоратизації оборонних підприємств та необхідність комплексного підходу, що поєднує економічні, юридичні та соціальні аспекти. Це відкриває нові перспективи для подальших досліджень та розробки конкретних пропозицій у цій важливій сфері.

### Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка пропозицій щодо корпоратизації оборонних підприємств в Україні, зосереджуючи увагу на необхідності інтеграції сучасних управлінських, економічних і технологічних підходів для підвищення ефективності та конкурентоспроможності галузі.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Існує протиріччя між плануванням ринкових відносин у вітчизняній економіці на макрорівні та незавершеною ринкових перетворень основної господарської ланки оборонно-промислової сфери, її підприємств. У своїй більшості оборонні підприємства, зберігаючи статус державних, мають унітарну внутрішню структуру. Проблема неподільності статутного капіталу унітарного підприємства не дозволяє в повному обсязі задіяти усі переваги ринкового господарювання на мікрорівні і взагалі стає перешкодою для здійснення оборонно-промислової діяльності у ринкових умовах.

В межах чинного законодавства унітарне підприємство державної форми власності об'єктивно не має можливості:

- організаційно і функціонально відокремити різні види діяльності;
- відповідним чином розподілити фінансові потоки;
- надати своїм структурним підрозділам навіть відносну господарську самостійність;
- реалізувати свій економічний інтерес шляхом вступу частиною свого майна в будь-яке об'єднання підприємств тощо.

Суб'єктивна сторона цієї проблеми полягає в застарілих схемах внутрішньогосподарського управління, які застосовуються з часів планової економіки, з 90-х років минулого століття практично не зазнали ніяких змін і продовжують базуватись на системі оперативного-календарного планування, які здатні підтримувати виробничі процеси при гарантованому забезпеченні необхідними ресурсами, відсутності значних коливань цін на них та максимальній наповненості обіговими коштами.

Як результат, неузгодженість з існуючими фінансовими потоками породжує ресурсний дефіцит, зростання подріблення виробництва та невиробничих витрат, що в підсумку тягне за собою помітне зниження господарської

діяльності. Наявність зазначених факторів не дозволяє спрямовувати внутрішню господарську роботу підприємств в площину товарно-грошових відносин, які є невід'ємною частиною ринкової економіки. А також досягти необхідної гнучкості господарської діяльності, притаманної ринковим принципам ведення господарств.

Продовженням цих прогалин є складності структурного характеру, що проявляються на більш високих рівнях ієрархії суб'єктів і об'єктів управління в оборонно-промисловій сфері у вигляді:

- обмежених можливостей для об'єднання підприємств в різні інтегровані структури, необхідність в яких виникає у процесі розгортання відповідної науково-технічної та виробничої кооперації, політичного та господарського керівництва ОПК;

- слабкості і недостатньої кількості системоутворюючих чинників, потрібних для формування промислового комплексу.

- недостатньої дієздатності й ефективності існуючої у країні системи державного управління оборонно-промисловою діяльністю при наявності суб'єктів господарювання різних форм власності.

Переважаюча організаційно-правова форма державного унітарного підприємства в ОПК має на увазі використання адміністративного впливу в якості основного засобу економічного, майнового і виробничого примусу. Але при ринковій сутності діючого економічного устрою це веде до появи нових додаткових непорозумінь, а саме:

- економічний інтерес, як головний стимул господарської діяльності в умовах ринку в більшості випадків підміняється банальним адмініструванням;

- принцип організації внутрішньої життєдіяльності суб'єктів господарювання державних форм власності залишаються на рівні командно-адміністративної системи, притаманній плановій економіці;

- набір можливих форм господарських зав'язків підприємств різних форм власності, їх взаємодії з державними органами помітно звужується;

- сукупність суб'єктів господарювання, зайнятих оборонно-промисловою діяльністю, органів керування ними за цілою низкою параметрів втрачає властивості цілісного утворення;

- система державного управління оборонно-промисловою сферою є невсеохоплюючою та незамкнутою і не здатна в повному обсязі виконати вимоги, що до неї висуваються тощо.

В оборонно-промисловій сфері необхідно знайти інші дієві фактори, які спроможні з одного боку, розв'язати наявні проблеми ринкового облаштування діяльності суб'єктів господарювання і безповоротно поставити її на ринкові рейки, а з іншого боку, створити незаперечні передумови для формування організаційної структури вітчизняного оборонно-промислового комплексу та системи державного управління ним, що відповідають ринковим принципам. Після кількох невдалих спроб перетворення вітчизняної оборонно-промислової сфери з метою приведення її до вимог діючого економічного устрою, стає очевидним, що в основі проблеми ринкової адаптації державних унітарних оборонних підприємств, які складають переважну більшість суб'єктів господарювання в ОПК, лежить неподільність її статутного капіталу.

На практиці із усіх способів розподілу статутного капіталу унітарних підприємств, передбачених чинним законодавством, найбільш часто зустрічаються два варіанти:

- 1) один з видів реорганізації у вигляді поділу підприємства на декілька юридичних осіб а також унітарного типу без змін організаційно-правової форми;

- 2) акціонування – поділ статутного капіталу юридичної особи на відповідну кількість рівновеликих частин, кожна з яких забезпечена акцією (*іменний цінний папір, який посвідчує майнові права його власника – акціонера...* [3].), що може бути предметом купівлі-продажу у сфері обігу цінних паперів, зі зміною організаційно-правової форми підприємства.

Перший варіант іноді знаходить своє застосування в ОПК, однак його не можна визнати універсальним тому, що він:

- не зберігає цілісність початкового суб'єкта господарювання;

- значно ускладнює систему управління, науково-технічну та виробничу кооперацію, оподаткування;

- фактично не впливає на ступінь адаптивності підприємства до ринкових умов;

- має об'єктивні межі у використанні (*абсолютизація даного управлінського інструментарію неминуче веде до необхідності надання статусу юридичної особи навіть найменшим структурним підрозділам підприємства (виробничим цехам)*).

Другий варіант володіє усіма необхідними якостями універсальності та ринковості, але його реалізація у господарській практиці чомусь асоціюється з одним з етапів приватизації [4].

Однак, якщо підприємство таки проакціоновано, а всі його акції залишаються у власності держави, тобто процедура акціонування не пов'язана з подальшим роздержавленням підприємства, об'єктивно створюється управлінський інструментарій, який дозволяє одночасно вирішити завдання: поділу статутного капіталу підприємства зі збереженням його цілісності; впровадження у внутрішню життєдіяльність підприємства ринкових форм і методів господарювання; визначення нового системоутворюючого чинника у формуванні оборонно-промислового

комплексу як системної цілісності у вигляді корпоративної залежності; створення принципово нової організаційної структури ОПК та системи державного та господарського управління ним.

Таким чином, корпоратизація підприємств оборонно-промислового комплексу, тобто їх перехід на акціонерну організаційно-правову форму, стає ключовим моментом усього процесу його реформування. Необхідно тільки підкреслити, що перехід на акціонерну організаційно-правову форму оборонних підприємств значною мірою змінить механізми управління державною власністю в оборонно-промисловому комплексі, коли право прийняття остаточних рішень буде належати не органу управління, а зборам акціонерів, в якому даному органу управління відводиться переважна роль за рахунок збереження контрольного пакету акцій у власності держави.

В той же час корпоратизація оборонних підприємств розкриває широкі перспективи для їх галузевого і тематичного комплексування з метою забезпечення:

- повноти і безперервності господарського управління шляхом створення державних акціонерних холдингових компаній за галузевою ознакою, що представляють собою галузеві (підгалузеві) горизонтально-інтегровані науково-виробничі об'єднання підприємств;

- цілеспрямованості діяльності ОПК на вирішення найбільш актуальних науково-технічних і виробничих завдань шляхом створення акціонерних товариств за тематичною ознакою, що представляють собою вертикально-інтегровані науково-виробничі об'єднання підприємств, призначені для реалізації конкретних науково-технічних, виробничих та зовнішньоекономічних проектів і програм, пов'язаних з підвищеними інноваційними та іншими ризиками, в тому числі за участю суб'єктів господарювання недержавних форм власності та банківського капіталу;

- синтезу галузевих та програмно-цілевих методів управління за рахунок одночасного входження підприємств частиною своїх акцій як в галузеві державні акціонерні холдингові компанії, так і в тематичні акціонерні товариства, що створені для реалізації конкретних проектів і програм;

- єдності науково-технічної, економічної та виробничої політики, що провадяться, пріоритетності принципів стратегічного менеджменту шляхом створення Національної акціонерної компанії, яка володіє контрольними пакетами акцій вищевказаних галузевих державних акціонерних холдингових компаній, тематичних акціонерних товариств та часткою акцій підприємств оборонно-промислового комплексу (для збільшення рівня капіталізації даної компанії);

- інноваційної спрямованості діяльності ОПК шляхом реального зближення науки і виробництва за рахунок єдиних економічних та інших інтересів промислових підприємств, науково-дослідних інститутів, конструкторських та технологічних бюро, що об'єктивно виникають у них в результаті участі в галузевих державних акціонерних холдингових компаніях і тематичних акціонерних товариствах та отримання права на частину прибутку від поточної діяльності галузі (підгалузі) ОПК або реалізації конкретних проектів і програм;

- інвестиційної привабливості вітчизняного оборонно-промислового комплексу та його складових частин (Національної акціонерної компанії, галузеві державні акціонерні холдингові компанії, тематичні акціонерні товариства, конкретні підприємства) шляхом підвищення рівня їх капіталізації та розкриття об'єктивної ринкової вартості;

- умов для послідовного наближення ОПК до фінансової самоокупності, науково-технічної, економічної та виробничої самодостатності, набуття ним здатності до саморозвитку.

При такому підході в статутні капітали вищевказаних господарських структур увійдуть: «Національна акціонерна компанія»: не менше 20,0% акцій кожного підприємств оборонно-промислового комплексу (акціонерні товариства, 100,0% акцій яких належать державі); не менше 50,0% плюс одна акція кожної галузевої державної акціонерної холдингової компанії; галузева (підгалузєва) державна акціонерна холдингова компанія: не менше 50,0% плюс одна акція кожного з підприємств оборонно-промислового комплексу (акціонерного товариства, 100,0% акцій якого належать державі), яке увійде до її складу.

Статутний капітал кожного тематичного акціонерного товариства, створеного (при необхідності) для реалізації конкретного науково-технічного або виробничого проекту чи програми, передбачається сформувати в таких пропорціях: 50,0% статутного капіталу плюс одна акція – за рахунок внеску Національної акціонерної компанії; до 25,0% статутного капіталу мінус одна акція – за рахунок внесків суб'єктів господарювання недержавних форм власності та комерційних банків; не менше 25,0% статутного капіталу – за рахунок внесків підприємств оборонно-промислового комплексу, що беруть участь в реалізації даного проекту або програми.

Тоді акції кожного із підприємств оборонно-промислового комплексу (акціонерного товариства, 100,0% акцій якого належать державі) розподіляться наступним чином: не менше ніж 20,0% акцій – внесок в статутний капітал Національної акціонерної компанії; не менше ніж 50,0% плюс одна акція – внесок в статутний капітал галузевої (підгалузєвої) державної акціонерної холдингової компанії, до якої відноситься підприємство; до 20,0% акцій – внески в статутні капітали тематичних акціонерних товариств, що призначені для реалізації конкретних проектів або програм, в яких бере участь підприємство; не менше ніж 10,0% мінус одна акція резервується для забезпечення пільгової підписки для керівництва та членів трудового колективу у разі можливої приватизації.

При цьому слід підкреслити наступні важливі обставини:

– засновником Національної акціонерної компанії повинен виступати Кабінет Міністрів України, якому має належати виключне право на розміщення акцій підприємств ОПК, галузевих державних акціонерних холдингових компаній, Національної акціонерної компанії, що перебувають у державній власності, яке реалізується шляхом випуску його нормативних актів (постанов чи розпоряджень);

– галузеві державні акціонерні холдингові компанії необхідно створювати не з кон'юнктурних міркувань на основі фактичного стану, який сформувався в тій чи іншій галузі або підгалузі оборонно-промислового комплексу (за принципом «від досягнутого»), а в залежності від змісту найбільш актуальних завдань з розвитку конкретних видів озброєння, що безумовно буде супроводжуватися відповідним перерозподілом існуючих експериментальних та виробничих потужностей між підприємствами, їх реорганізацією, а, може бути, і створенням нових юридичних осіб;

– в кожній галузевій державній акціонерній холдинговій компанії (за винятком зовнішньоекономічної діяльності) необхідно визначити головну профільну наукову організацію і призначити Генерального конструктора з відповідного виду озброєння та військової техніки;

– для забезпечення реалізації найбільш загальних для оборонно-промислового комплексу функцій доцільно мати ряд науково-дослідних, проектних та інших організацій центрального підпорядкування, які не будуть входить до складу галузевих державних акціонерних холдингових компаній;

– не слід допускати участь суб'єктів господарської діяльності недержавних форм власності та комерційних банків у галузевих державних акціонерних холдингових компаніях, бо вони, як правило, мають інтерес не до якоїсь галузі, а до конкретних проектів. Їх участь у тематичних акціонерних товариствах, створених для реалізації конкретних проектів і програм, можлива тільки за умови збереження за державою контрольного пакета акцій у статутному капіталі таких акціонерних товариств.

Але в нормативно-правовому полі корпоратизації є цілий ряд протиріч, які належить усунути, а саме необхідні заміни в Господарський кодекс України, Цивільний кодекс України, Законів України «Про господарські товариства», «Про холдингові компанії в Україні» та Закону України «Про управління об'єктами державної власності». Для врегулювання суперечностей і створення належних умов для реформування оборонно-промислового комплексу пропонуються деякі давно назрілі зміни до чинних законодавчих актів, що стосуються виключно підприємств ОПК.

Реалізація зазначеного можливо відповідно до трьох сценаріїв.

Перший: на період реформування оборонно-промислового комплексу (3–4 роки) створюється центральний орган виконавчої влади, що володіє усіма повноваженнями з управління об'єктами державної власності в оборонно-промисловій сфері, які встановлені чинним законодавством. Йому перепідпорядковуються усі підприємства оборонно-промислового комплексу.

Цей орган негайно проводить реструктуризацію та корпоратизацію підприємств ОПК і вносить Кабінету Міністрів України пропозиції щодо створення Національної акціонерної компанії, галузевих державних акціонерних холдингових компаній, тематичних акціонерних товариств (при необхідності). Після того, як Кабінет Міністрів України своїми нормативними актами сформує зазначені об'єднання підприємств, потреба в такому центральному органі виконавчої влади відпадає і він може бути ліквідований.

Переваги: істотне прискорення процесу реформування ОПК за рахунок наявності керівного органу, що володіє всіма необхідними повноваженнями в оборонно-промисловій сфері, передбаченими чинним законодавством.

Недоліки: збільшення чисельності управлінського персоналу державних органів влади; значний часовий інтервал, необхідний для створення нового центрального органу виконавчої влади і перепідпорядкування йому всіх підприємств ОПК.

Другий: державний концерн офіційно надає Кабінету Міністрів України пропозиції щодо створення Національної акціонерної компанії, галузевих державних акціонерних холдингових компаній, тематичних акціонерних товариств (при необхідності) він не може, бо не має відповідних повноважень. Цю роботу може виконати тільки центральний орган виконавчої влади, наприклад Міністерство стратегічних галузей промисловості України. Але тоді необхідно перепідпорядкувати йому усі підприємства ОПК, після чого подальші роль і місце Концерну стають невизначеними.

Кабінет Міністрів України своїми нормативними актами формує Національну акціонерну компанію, галузеві державні акціонерні холдингові компанії, тематичні акціонерні товариства (при необхідності), після чого усі підприємства ОПК виводяться з підпорядкування Міністерства стратегічних галузей промисловості України.

Переваги: відсутність необхідності створення нового центрального органу виконавчої влади.

Недоліки: значний часовий інтервал, необхідний для перепідпорядкування усіх підприємств ОПК Міністерству економічного розвитку і торгівлі; невизначеність подальшої долі Державного концерну.

Третій: державний концерн здійснює реструктуризацію та корпоратизацію підприємств ОПК. Кабінет Міністрів України, як засновник Концерну, в ініціативному порядку своїми нормативними актами: корпоратизує

Державний концерн і перетворює його в Національну акціонерну компанію, наповнюючи статутний капітал Компанії пакетами акцій підприємств ОПК; створює галузеві державні акціонерні холдингові компанії, при цьому, формує їх статутні капітали за рахунок контрольних пакетів акцій підприємств, передає контрольні пакети акцій даних компаній до статутного фонду Національній акціонерній компанії, приймає участь у створенні тематичних акціонерних товариств (при необхідності).

При цьому сценарії досягається найбільш істотна мінімізація чисельності управлінського персоналу державних органів влади та часового інтервалу, необхідного для реформування ОПК, і зберігаються роль і місце існуючого Державного концерну в життєдіяльності оборонно-промислового комплексу.

#### Висновки

Таким чином пропонується сформувати принципово нову організаційну структуру вітчизняного оборонно-промислового комплексу та систему державного управління ним, що вирішальним чином стає можливим за рахунок переходу оборонних підприємств на акціонерну організаційно-правову форму.

#### Список використаної літератури

1. Оцабрик І.І. Реформування оборонно-промислового комплексу України: ключові проблеми // Вчені записки Університету «КРОК». 2018. Випуск 49. С. 32-38. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://surl.li/urupsd>
2. Звонко І.М. Особливості розвитку оборонно-промислового комплексу України після відновлення незалежності (1990-ті роки). // Культурологічний альманах. Вип. 2, 2023. С. 58-63. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://surl.li/dpigqn>
3. Закон України: Про цінні папери та фондовий ринок від 23 лютого 2006 року № 3480-IV // Офіційний вісник України, 2006. № 13. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://zakononline.com.ua/documents/show/270987\\_561511](https://zakononline.com.ua/documents/show/270987_561511)
4. Олійник В.Я., Кірова Л.Л. Концентрація капіталу і господарського контролю в процесі розвитку корпоратизації економіки // Вісник СевГТУ. Севастополь: Видавництво СевНТУ, 2005 Випуск 54: Економіка і фінанси. С. 99-107.

#### References

1. Otsabryk I.I. (2018). Reformuvannia oboronno-promyslovoho kompleksu Ukrainy: kliuchovi problemy. [Reforming the defense-industrial complex of Ukraine: key problems]. *Vcheni zapysky Universytetu «KROK»* [Scientific notes of «KROC» University] vol. 49. pp. 32-38. Retrieved from: <http://surl.li/urupsd>
2. Zvonko I.M. (2023). Osoblyvosti rozvytku oboronno-promyslovoho kompleksu Ukrainy pislia vidnovlennia nezalezhnosti (1990-ti roky). [Features of the development of the defense-industrial complex of Ukraine after the restoration of independence (1990s)]. *Kul'turolohichnyj al'manakh* [Cultural almanac] vol. 2. pp. 58-63. Retrieved from: <http://surl.li/dpigqn>
3. Zakon Ukrainy: Pro tsinni papery ta fondovij rynek vid 23 liutoho 2006 roku № 3480-IV // Ofitsijnyj visnyk Ukrainy, 2006. № 13. [Elektronnyj resurs]. Rezhym dostupu: [https://zakononline.com.ua/documents/show/270987\\_561511](https://zakononline.com.ua/documents/show/270987_561511)
4. Olijnyk V.Ya., Kirova L.L. (2005). Kontsentratsiia kapitalu i hospodars'koho kontroliu v protsesi rozvytku korporatyzatsii ekonomiky. [Concentration of capital and economic control in the process of development of corporatization of the economy]. *Visnyk SevHTU: Ekonomika i finansy* [Bulletin of SevGTU]. vol. 54. pp. 99-107.



Л. Р. СТРУТИНСЬКА

кандидат економічних наук, доцент,  
доцент кафедри менеджменту персоналу і адміністрування  
Національний університет «Львівська політехніка»  
ORCID: 0000-0002-0401-5475

С. Є. БОЙКІВСЬКА

студентка  
Національний університет «Львівська політехніка»

## ОПТИМІЗАЦІЯ ВАРТОСТІ НАВЧАННЯ СТУДЕНТІВ, ЩО НАВЧАЮТЬСЯ ЗА КОШТИ ФІЗИЧНИХ ЧИ ЮРИДИЧНИХ ОСІБ

*Проаналізовано результати набору державними закладами вищої освіти студентів, що навчаються за кошти фізичних чи юридичних осіб, на освітніх професійних програмах галузі знань 13 «Механічна інженерія» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування». Встановлено, що порівняно із попередніми навчальними роками у наборі 2023–2024 навчального року на 50–70% збільшилась чисельність студентів цієї категорії. Пропорційно від 20 тис. грн. до 40–45 тис. грн. збільшились у державних ЗВО і обсяги річної оплати студентами їх комерційного навчання.*

*Виявлено, що заклади вищої освіти як надавачі освітніх послуг, не надають фізичним чи юридичним особам, які оплачують навчання студентів-комерційників, детальної інформації щодо переліку статей витрат сплачених коштів. Обумовлено це, очевидно, відсутністю в них науково обґрунтованих методик розрахунків витрат на провадження навчального процесу для студентів денної форми навчання.*

*Запропонована методика оптимізації вартості навчання студентів, що навчаються за кошти фізичних чи юридичних осіб на денній формі навчання. Дана методика ґрунтується на застосуванні розроблених математичних залежностей, що дозволяють обчислити витрати ЗВО на навчання студента денної форми навчання, загалом, та студента-комерційника, зокрема.*

*Запропоновані математичні залежності розрахунків вартості навчання студентів ґрунтуються на врахуванні обсягів заробітної плати штатних викладачів професорсько-викладацького складу та допоміжного персоналу ЗВО, причетних до провадження навчального процесу. Також враховані витрати закладу освіти на якісне забезпечення провадження навчального процесу та дотримання санітарно-гігієнічних норм його здійснення.*

*На прикладі освітньо-професійної програми підготовки студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» в Інституті механічної інженерії та транспорту Національного університету «Львівська політехніка» проілюстрована спроможність запропонованої методики доволі точно розрахувати вартість річного навчання студента денної форми навчання за кошти фізичних чи юридичних осіб. Цілком очікувано вона виявилась на 17% нижчою від встановленої адміністрацією цього ЗВО вартості річного навчання.*

**Ключові слова:** вища освіта, машинобудування, спеціальність, денна форма навчання, вартість.

L. R. STRUTYNSKA

PhD in Economics, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Personnel Management and Administration  
Lviv Polytechnic National University  
ORCID: 0000-0002-0401-5475

S. YE. BOIKIVSKA

Student  
Lviv Polytechnic National University

## OPTIMIZATION OF THE COST OF EDUCATION OF STUDENTS EDUCATED AT THE EXPENSE OF INDIVIDUALS OR LEGAL ENTITIES

*The results of recruitment by state institutions of higher education of students studying at the expense of individuals or legal entities in educational professional programs of the field of knowledge 13 "Mechanical engineering" specialty 133 "Industrial mechanical engineering" were analyzed. It was established that, compared to previous academic years, the number of students in this category increased by 50–70% in the 2023–2024 academic year. Proportionately from UAH 20,000 up to 40–45 thousand UAH, the amount of annual payment by students for their commercial studies also increased in state higher education institutions.*

*It was found that institutions of higher education, as providers of educational services, do not provide individuals or legal entities that pay for the education of commercial students, detailed information on the list of expenditure items of paid funds. This is due, obviously, to the lack of scientifically based methods for calculating the costs of conducting the educational process for full-time students.*

*The method of optimizing the cost of education for students studying at the expense of individuals or legal entities on a full-time basis is proposed. This technique is based on the application of developed mathematical dependencies that allow calculating the costs of higher education institutions for training a full-time student, in general, and a commercial student, in particular.*

*The proposed mathematical dependencies for calculating the cost of student education are based on taking into account the amount of salaries of full-time teachers of the teaching staff and auxiliary staff of higher education institutions involved in the implementation of the educational process. Also taken into account are the costs of the educational institution for quality assurance of the educational process and compliance with sanitary and hygienic norms of its implementation.*

*Using the example of the educational and professional training program for students of specialty 133 "Industrial Mechanical Engineering" at the Institute of Mechanical Engineering and Transport of the National University "Lviv Polytechnic", the ability of the proposed method to fairly accurately calculate the cost of a full-time student's annual education at the expense of individuals or legal entities is illustrated. Quite expectedly, it turned out to be 17% lower than the annual tuition fee set by the administration of this higher education institution.*

**Key words:** higher education, mechanical engineering, specialty, full-time education, cost.

### Постановка проблеми

Із запровадженням Міністерством освіти та науки України для закладів вищої освіти (ЗВО) державної форми власності регулювання кількості та обсягів набору абітурієнтів на певні напрями підготовки відчутно збільшилась кількість студентів, що навчаються за кошти фізичних чи юридичних осіб. У обиході регулювання державою кількості виділених тому чи іншому навчальному закладу місць набору студентів на певні освітні програми підготовки набуло розповсюджене формулювання «навчання на держбюджетне фінансування», а студентів, що навчаються за кошти фізичних чи юридичних осіб називають «студентами-комерційниками».

Без сумніву, регулювання на рівні держави кількості фахівців із вищою освітою, підготовлених її коштами для конкретних важливих для народного господарства галузей, виробництва та сфер побуту – справа важлива та своєчасна. Проте закономірно, що кількість місць держзамовлення фактично ніколи не співпадає із обсягами ліцензованих тією ж таки державною службою ліцензування та акредитації напрямів підготовки. Тому цю різницю між обсягами ліцензованого набору та наданими місцями держзамовлення заклади освіти державної форми власності успішно намагаються дозаповнити студентами «комерційного» навчання.

### Формулювання мети дослідження

Проблематиці дослідження витрат на провадження навчального процесу, а відповідно, і обумовленою цим вартістю надання освітніх послуг приділялось доволі багато уваги як на теренах України, так і поза її межами. Особливої актуальності ця проблематика набула на межі двох останніх тисячоліть. Саме на цей період потрапив новий етап суспільного розвитку людства, в основі якого постали інформаційні технології та комп'ютеризація усіх без винятку сфер буття та галузей діяльності людства. Такий якісний стрибок ґрунтовно видозмінив вимоги до системи формування знань усіх членів суспільства, перевівши освітній процес від одноразового чи дискретного в минулому до неперервного у сьогоденні [1,2]. На даному етапі програму запровадження і повсемісного розповсюдження безперервної освіти ЮНЕСКО визнає першочерговою і однією із найвагоміших, а «Велика сімка» індустріально найрозвинутіших держав світу трактує її як основний стратегічний засіб боротьби із безробіттям [3]. Програма «Освіта впродовж життя» згідно із European Lifelong Learning Initiative (ELLI) має за свою кінцеву мету – забезпечити сучасну людину знаннями, що дозволять їй успішно жити у світовому просторі, який невинно і безперервно видозмінюється [4].

Звичайно такі стрімкі темпи перебудови освітнього простору незалежній Україні із знекровленою війною економікою непосильні [5]. Коли вища освіта постає життєвою необхідністю переважної більшості населення – бюджету держави із цим не впоратися. Переконливе підтвердження цьому – змушено запроваджене рішення уряду Німеччини щодо обов'язкової сплати студентами всіх без винятку форм навчання його вартості. Надто вартісним і непомірно обтяжливим для бюджету країни постає сучасний рівень освітнього простору та попит на нього. Це і змушує вишукувати додаткові кошти для його фінансового забезпечення. Вірніше, не вишукувати, а визнати і узаконити необхідність додаткового фінансування освіти коштами користувачів освітніх послуг – студентів, їх родичів, меценатів, зацікавлених сторін тощо. Одним словом – «фізичних та юридичних осіб» [6]. І тут на чільне місце постає зважена цінова політика надання ЗВО освітніх послуг, яка повинна ґрунтуватись на аналізі фінансової спроможності громадян України у бодай частковій дотації освіти [7].

Дослідженням та аналізу проблем цінової політики надання освітніх послуг ЗВО різноманітних форм власності присвячено понад 300 наукових праць. У тому числі і роботи таких провідних вчених як В. Андрушенко [8], В.І. Астахова [9], І.С. Афтаназів [5,6,10], О.Л. Сидоренко, В.М. Огаренко, І.І. Тимошенко та інші. Спільним

об'єднуючим ці дослідження висновком є твердження, що окрім врахування видатків закладів освіти та провадження навчального процесу, цінова політика неодмінно повинна враховувати фінансові можливості регіональних користувачів наданих їм освітніх послуг. Із цього приводу Начальник управління гуманітарного розвитку Міністерства економіки та питань європейської інтеграції України Ю. Вітенко свого часу відзначив, що «... ринкові засади вимагають розглядати діяльність закладів освіти як виробників і продавців освітніх послуг, ... при цьому основним регулятором між обсягами пропозицій та попиту має бути ціна за надані освітні послуги» [5].

Проте не зважаючи на доволі ґрунтовні дослідження, так би мовити корифеїв та «піонерів» запровадження на теренах України ринку платних освітніх послуг, у переважаючій більшості вартість наданих ЗВО різноманітних освітніх послуг встановлюють переважно безпосередньо адміністрація або власники закладу освіти [11,12]. Зрідка опираючись на власні калькуляції видатків, а переважно на вартість навчання у сусідніх співрозмірних за рангом та конкурентоспроможністю закладах освіти. До того ж щорічно підвищуючи її, мотивуючи це інфляційними процесами [13,14].

Таким чином можна відзначити, що не зважаючи на значну кількість публікацій стосовно цінової політики у сфері надання освітніх послуг, питання оптимізації витрат на провадження навчального процесу та встановлення прийнятних для користувачів цін на надані освітні послуги все ще залишається актуальним.

### **Викладення основного матеріалу дослідження**

Студенти-комерційники, що навчаються за кошти фізичних чи юридичних осіб, своєю оплатою навчання є не тільки основою функціонування закладів освіти приватної форми власності, а і відчутним джерелом поповнення бюджетів державних закладів освіти. Особливо на теперішньому етапі обмеженості виділених державою коштів на соціальні потреби загалом і освіти зокрема, обумовленої воєнними подіями на території України. Ось уже декілька років поспіль обсяги бюджетного фінансування державних ЗВО фактично знаходяться в межах виділення коштів лише на заробітну плату професорсько-викладацького складу та стипендій студентів. Кошти не енергоносії, комунальні витрати, утримання, обслуговування та ремонти навчальних корпусів та гуртожитків заклади вищої освіти вимушені використовувати із сформованих власними силами та діяльністю так званих спеціальних фондів. Спеціальних фондів, основними джерелами наповнення яких є, поряд із доходами від наукової діяльності, кошти за навчання студентів-комерційників фактично постали чи не основним джерелом накопичення коштів на функціонування та розвиток ЗВО. Очевидно саме тому впродовж останніх років стрімко зросла кількість студентів, що навчаються за кошти фізичних та юридичних осіб.

Метою даного дослідження є створення методики оптимізації вартості надання освітніх послуг державними ЗВО студентам, що навчаються за кошти фізичних або юридичних осіб.

Основними задачами дослідження були:

- аналіз цінової політики у сфері надання освітніх послуг державними закладами вищої освіти України;
- аналіз обсягів основних витрат закладів освіти на провадження якісного навчального процесу;
- розробка методики оптимізації обсягів вартості навчання для студентів денної форми навчання державних ЗВО;
- розробка пропозицій щодо здешевлення для населення України освітніх послуг, наданих державними ЗВО, та аналіз їх ефективності на етапах виробничої діяльності випускників ЗВО.

Збільшення попиту в населення на оплатну форму навчання в державних ЗВО, обумовлені воєнними подіями нестабільності гривневої грошової одиниці та відчутний спад економіки держави неминуче сприяють стрімкому повсемісному підвищенню вартості комерційного навчання. Підвищенню вартості, яке доволі часто не обґрунтоване затратами на його провадження. А найгірше, що стрімке зростання вартості комерційного навчання позбавляє можливості набуття вищої освіти молоддю із обмеженими фінансовими можливостями їх батьків. При цьому не тільки порушується основний принцип успішності ринкових відносин «ціна-якість», а і конституційні права молодих людей із фінансово неспроможних сімей на здобуття ними вищої освіти.

Надавши державним ЗВО певну автономію у провадженні ними своєї економічної діяльності, у тому числі і в зароблянні коштів у сфері освітніх послуг, держава фактично самоусунулась від регулювання тут цінової політики. Скориставшись цією ситуацією окремі державні ЗВО підвищують вартість річного навчання студентів-комерційників на престижних напрямках підготовки до захмарних 50–60 тисяч гривень, що стає не тільки обтяжливим для сімей середнього рівня достатків в Україні, а і абсолютно непосильним для мало забезпечених родин.

Доволі дивно, та переважно заклади вищої освіти утаємничують і не розголошують механізм цільового використання коштів комерційного навчання безпосередньо в навчальному процесі, не ознайомлюють споживачів освітніх послуг із методиками розрахунків вартості навчання. Цілком ймовірно, що у адміністрацій таких ЗВО ці методики взагалі відсутні, а призначення вартості комерційного навчання здійснюється виключно інтуїтивно, опираючись на цінову політику сусідніх чи престижних закладів освіти. І зрозуміло, що тут спрацьовує особистісна зацікавленість усіх комерційних надавачів послуг, що полягає у тому, аби якомога дорожче продати на ринку продукт своєї діяльності. І доволі часто при цьому нехтують якістю наданих послуг, яка у сфері освітньої діяльності була, є і залишатиметься кінцевою метою не тільки набутої студентами освіти, а і основою їх фахової підготовки.

Запропонована методика оптимізації вартості навчання студентів, що навчаються за кошти юридичних чи фізичних осіб, передбачає виконання декількох послідовних етапів. На першому етапі визначають основні чинники, які мають визначальний вплив на вартість навчання студентів-комерційників. На нашу думку, до таких визначальних чинників мали б належати наступні:

- витрати  $Z_B$  на заробітну плату викладачів, що проводять навчальний процес;
- витрати  $Z_M$  на заробітну плату працівників допоміжного персоналу, що забезпечують належну організацію навчального процесу;
- господарські  $B_z$  витрати на служби життєзабезпечення;
- витрати  $B_e$  на енергоносії та комунальні затрати, обумовлені потребою забезпечення належних умов та санітарно-гігієнічних норм провадження навчального процесу;
- витрати  $B_p$  на обслуговування та ремонти навчальних корпусів та гуртожитків.

При визначенні витрат на заробітну плату викладачів та допоміжного персоналу за вихідні дані для розрахунку приймають чисельні показники інституту чи факультету, де здобувають освіту студенти-комерційники академічної групи аналізованої освітньої програми підготовки. А при визначенні витрат на служби забезпечення та обслуговування навчального процесу до розрахунків доречно приймати чисельні дані ЗВО загалом.

Для здійснення розрахунків вартості навчання запропонована методика оптимізації його вартості рекомендує скористатись розробленими для цього математичними залежностями. Тут витрати на провадження навчального процесу в перерахунку на одного студента денної форми навчання аналізованого інституту, факультету чи напряму підготовки визначають із математичної залежності

$$B_{oc} = \frac{Z_B + Z_M}{N_1} + \frac{B_K}{N}, \quad (1)$$

де

$B_K = B_e + B_p + B_z$  – витрати на забезпечення провадження навчального процесу;

$N_1$  – кількість студентів денної форми навчання аналізованого факультету, інституту, чи напряму підготовки;

$N$  – кількість студентів денної форми навчання аналізованого ЗВО;

То ді витрати на навчання студентів-комерційників становитимуть

$$B_{ком} = \left( \frac{Z_B + Z_M}{N_1} + \frac{B_K}{N} \right) \cdot n, \quad (2)$$

де

$n$  – кількість студентів\_комерційників аналізованого напряму підготовки.

Розрахунок вартості навчання студентів-комерційників доречно здійснювати через аналіз витрат на навчання однієї уявної академічної групи, наприклад, чисельністю 25 осіб.

Тоді річні витрати на навчання однієї академічної групи визначають із залежності

$$B_{a.z} = Z_B + Z_M + \frac{B_K}{N}, \quad (3)$$

а вартість навчання студентів-комерційників по кожній із ліцензованих для ЗВО освітній програмі підготовки можна визначити із математичної залежності

$$T_{oc} = \frac{B_{a.z} \cdot k}{n} = \left( Z_B + Z_M + \frac{B_K}{N} \right) \frac{k}{n} \quad (4)$$

де  $k$  – коефіцієнт престижності напряму підготовки,

$n$  – кількість студентів, що навчаються за кошти фізичних чи юридичних осіб, в умовно сформованій академічній групі аналізованої освітньої програми підготовки.

Звичайно закономірно, що навіть в межах одного факультету чи інституту ЗВО вартість навчання студентів за кошти фізичних чи юридичних осіб може суттєво відрізнятись залежно від попиту користувачів освітніх послуг, який переважно називають престижністю тих чи інших напрямів підготовки. Престижність напрямів підготовки можна відобразити умовним коефіцієнтом престижності  $k$ , змінюючи його величину в діапазоні від 1,2 до 2,0, наприклад, на підставі даних щодо прохідних балів попередніх років набору на ту чи іншу освітню програму підготовки. Його реальну величину, наприклад, можна розраховувати із залежності  $k = \frac{K_{\delta}}{100}$ , як соту частку від значення конкурсного прохідного балу  $K_{\delta}$  для конкретної аналізованої освітньої програми підготовки.

Перевірку ефективності запропонованої методики оптимізації вартості навчання студентів денної форми, що здобувають освіту за кошти фізичних чи юридичних осіб, здійснено на прикладі визначення вартості навчання для студентів-комерційників Інституту механічної інженерії та транспорту (ІМІТ) Національного університету

«Львівська політехніка» (НУ «ЛП»). Розраховано у відповідності запропонованій методиці вартість навчання студентів-комерційників освітньої програми галузі знань 13 «Механічна інженерія» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» набору 2022/2023 навчального року. Вихідні дані розрахунку відображено в таблиці.

Таблиця 1

**Вихідні дані розрахунку вартості навчання студентів денної форми навчання Річні витрати на навчання одної академічної групи студентів із оплатою навчання фізичними чи юридичними особами**

№ з/п	Витрати на провадження навчального процесу:			Організаційні витрати на провадження навчального процесу			Господарські витрати на забезпечення навчального процесу	
	Заробітна плата: грн.	Кількість штатних одиниць	Всього витрат, тис. грн.	Заробітна плата: грн.	Кількість	Всього витрат, тис. грн.	Статті витрат	Вартість тис. грн.
1	а) викладачі, 144 тис. грн.	2	360	а) методисти деканату 115 тис. грн.	0,25	28,75	1. Енергоносії	143·10 <sup>3</sup>
2	б) працівники підприємств виробничих та технологічних практик 7,5 тис. грн.	0,25	7,5	б) працівники адміністрації, 150 тис. грн.	0,25	37,5	2. Утримання та ремонт корпусів і приміщень	267·10 <sup>3</sup>
3				в) лаборанти випускової кафедри, 115 тис. грн.	0,25	28,75	3. Утримання гуртожитків	71,5·10 <sup>3</sup>
				г) працівники бібліотек та служб комп'ютерного забезпечення, 115 тис. грн.	0,25	28,75	4. Утримання служб життєзабезпечення (автомобільний транспорт, енергозабезпечення ремонтні служби тощо)	35·10 <sup>3</sup>
Всього			295,5 тис. грн.	Всього		123,75 тис. грн.	Всього	571,65·10 <sup>3</sup> тис. грн.

Для більшої наочності розрахунків вартості навчання студентів-комерційників у таблиці приведено вихідні дані для умовно сформованої академічної групи студентів чисельністю 25 осіб.

У таблиці до розділу Витрати на провадження навчального процесу віднесено дві групи витрат, а саме:

- річна заробітна плата викладачів, залучених до провадження навчального процесу;
- витрати на оплату праці працівникам підприємств під час проходження студентами виробничих та переддипломної практик.

Кількість викладачів, залучених до провадження навчального процесу в академічній групі студентів чисельністю 25 осіб, визначено із наступних міркувань. Семестровий навчальний період триває 15 тижнів, впродовж одного календарного тижня студенти аудиторно навчаються на 20 парах, витрачаючи на це 40 академічних годин (із розрахунку 4 пари в день). Отже впродовж одного семестру одна умовно сформована академічна група студентів аудиторно навчається  $15 \times 40 = 600$  годин.

Саме такою обсягом 600 аудиторних годин є рекомендована в НУ «ЛП» норма аудиторного навантаження викладача професорсько-викладацького складу. Отже впродовж одного навчального семестру на провадження навчального процесу на заробітну плату викладачів тут витрачається сума, співрозмірна із річною заробітною платою одного штатного викладача. Обсяг цієї річної заробітної плати прийнято в межах 144 тисяч гривень, що більш-менш відповідає середньо статистичній місячній заробітній платі викладача ЗВО в обсязі 12 тисяч гривень.

Із аналогічних міркувань розраховуються організаційні витрати на провадження навчального процесу допоміжним персоналом. Тут умовно прийнято, що на одну аналізовану академічну групу цілком буде достатньо витрат заробітної плати в межах четвертої частини тарифної ставки заробітної плати одного працівника допоміжного персоналу по кожній із чотирьох виокремлених в таблиці служб допоміжного персоналу.

Обсяг «Господарських витрат на забезпечення навчального процесу» запозичено із річного Звіту адміністрації НУ «ЛП» у довоєнний 2021 рік.

При підстановці табличних даних у математичну залежність (4) розраховано вартість річного навчання студента, що навчається за кошти фізичних чи юридичних осіб, денної форми навчання за освітньою програмою підготовки галузі знань 13 «Механічна інженерія» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» набору 2022/2023 навчального року, а саме

$$T_{oc} = \frac{B_{a.e.} \cdot k}{n} = \left( Z_B + Z_M + \frac{B_K}{N} \right) \frac{k}{n} = \left( 295500 + 123750 + \frac{571,65 \cdot 10^6}{22200} \right) \cdot \frac{1,2}{25} = 21360 \text{ грн.}$$

Тут прийнято, що коефіцієнт престижності даної освітньої програми підготовки на той час становив  $k=1,2$ .

Встановлена на 2021/2022 навчальний рік вартість навчання студента денної форми навчання на відзначену освітню програму підготовки становила 25 тисяч гривень. Такою ж вона залишається і на теперішній час.

Відсоток перевищення встановленої адміністрацією НУ «ЛП» вартості навчання в Інституті механічної інженерії та транспорту над реальними витратами на провадження навчального процесу тут знаходиться в межах допустимих 15–20%. Це цілком допустимо, враховуючи нестабільність курсу грошової одиниці.

А от призначена цією адміністрацією вартість річного навчання на престижних у сьогоднішніх напрямках підготовки «Журналістика» Інституту права, психології та інноваційної освіти та «Комп'ютерні науки» Інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій в обсязі 36 тисяч гривень, що на 70% перевищує рівень витрат на навчання, явно безпідставно завищена і потребує корегування. Таке безпідставне завищення цін на надання освітніх послуг явно порушує певні права громадян на здобуття освіти і є підставою для розгляду державним Антимонопольним комітетом.

### Висновки

1. Аналізом обсягів оплати навчання студентами, що навчаються за кошти фізичних чи юридичних осіб на денній формі навчання в державних закладах освіти України, встановлена відсутність науково-обґрунтованих методик розрахунків витрат на провадження цього навчального процесу та обсягів оплати його вартості.

2. Запропонована методика оптимізації вартості навчання студентів-комерційників у державних закладах вищої освіти ґрунтується на врахуванні витрат закладів освіти на провадження навчального процесу.

3. Основними складовими витрат державних ЗВО на провадження навчального процесу є витрати на заробітну плату викладачів професорсько-викладацького складу, причетного до провадження навчального процесу допоміжного персоналу та витрати на забезпечення належних умов, безпеки і санітарно-гігієнічних норм усіх учасників навчального процесу.

4. Запропоновані математичні залежності для визначення обсягів витрат на провадження навчального процесу та річної вартості навчання для студентів, що навчаються за кошти фізичних чи юридичних осіб, перевірено на прикладі встановлення вартості навчання студентів денної форми навчання спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» Інституту механічної інженерії та транспорту НУ «ЛП». Порівняння відображає, що встановлена адміністрацією цього ЗВО річна вартість навчання на 17% перевищує обсяги витрат закладу освіти на його провадження.

### Список використаної літератури

1. Кратт О.А. Оцінка наслідків зміни кон'юнктури ринку послуг вищої освіти на діяльність вищого навчального закладу // *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2005. № 4. С. 45–51.
2. Куценко В.І., Остафійчук Я.В. Регіональні особливості формування ринку освітніх послуг: стан, проблеми, перспективи // *Науковий вісник Волинського державного університету імені Лесі Українки*. 2003. № 12. С. 80–86.
3. Коцкулич Т.Я. Калькулювання собівартості платних освітніх послуг у закладах вищої освіти як передумова формування економічно обґрунтованої вартості. *Європейський вектор економічного розвитку*. 2019. № 1 (26). С. 96–107.
4. Оболенська Т.Є. Маркетинг освітніх послуг: вітчизняний та зарубіжний досвід: монографія. Київ : КНЕУ, 2001. 208 с.
5. Афтаназів І.С. Економічні аспекти реформування регіональної системи підготовки кадрів вищою школою. – Коломия: Вид-во «Вік», 2007. 222 с.
6. Григораш О. В. Фінансові аспекти формування ринку освітніх послуг в Україні на прикладі спеціальності 072 «Фінанси, банківська справа та страхування». *Наукові записки Національного університету «Острозька академія». Серія «Економіка»*: 2023. № 28 (56). С. 52–57.
7. Труніна І. М., Пряхіна К. А., Андрієнко М. С. Ціноутворення на ринку вищої освіти України. *Ефективна економіка*. 2021. № 10. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=9422>.
8. Андрущенко В. Економіка освіти ринково спрямованого суспільства // *Вища освіта України*. 2002. № 2. С. 10–15.
9. Астахова В.І. Наукові дослідження у приватних ВНЗ: перші досягнення, перспективи // *Вища освіта України*. 2003. № 1. С. 22–26.
10. Афтаназів І.С. Аналіз потреб мешканців регіонів у фахівців із вищою освітою // *Вісник НУ «Львівська політехніка» «Менеджмент та підприємництво: етапи становлення і проблеми розвитку»*. Львів: Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2006. № 567. С. 378–384.

11. Костриченко В. М., Красовська Ю. В. Методичні особливості формування цін на платні послуги вищих навчальних закладів. *Економіка і суспільство*. 2017. № 13. С. 525–530.
12. Жихарева В. В., Познанська І. В., Баришнікова В. В. Методика аналізу беззбитковості освітніх послуг у маркетинговій діяльності університету. *Modern Economics*. 2020. № 23. С. 62–68.
13. Шашкевич О. Вартість освітніх послуг у вищих навчальних закладах: моделювання оптимальної ціни. *Світ фінансів*. 2007, Вип. 3 (12). – С. 112–119.
14. Костенко І. С. Роль індикативної собівартості у формуванні ринку освітніх послуг в Україні. *Бізнес Інформ*. 2020. № 5 (508). С. 295–305.

#### References

1. Kratt O.A. (2005) Otsinka naslidkiv zminy koniunktury rynku posluh vyshchoi osvity na diialnist vyshchoho navchalnoho zakladu [Assessment of the consequences of changes in the market for higher education services on the activities of a higher educational institution]. *Scientific Bulletin of the National Mining University*. no. 4. pp. 45–51.
2. Kutsenko V.I., Ostafiichuk Ya.V. (2003) Rehionalni osoblyvosti formuvannia rynku osvitnikh posluh: stan, problemy, perspektyvy [Regional features of educational services market formation: status, problems, prospects]. *Scientific Bulletin of Lesya Ukrainka Volyn State University*. no. 12. pp. 80–86.
3. Kotskulych T.Ia. (2019) Kalkuliuvannia sobivartosti platnykh osvitnikh posluh u zakladakh vyshchoi osvity yak peredumova formuvannia ekonomichno obgruntovanoi vartosti. Yevropeiskyi vektor ekonomichnoho rozvytku. [Calculating the cost of paid educational services in institutions of higher education as a prerequisite for the formation of an economically justified cost]. *European vector of economic development*. vol. 26. no. 1. pp. 96–107.
4. Obolenska T.Ie. (2001). Marketynh osvitnikh posluh: vitchyzniani ta zarubizhnyi dosvid: monohrafiia. [Marketing of educational services: domestic and foreign experience: monograph]. Kyiv: KNEU (in Ukrainian), P. 208.
5. Aftanaziv I.S. (2007) Ekonomichni aspekty reformuvannia rehionalnoi systemy pidhotovky kadriv vyshchoiu shkoloiu. [Economic aspects of reforming the regional system of personnel training by the higher school] Kolomyia: "Vik" Publishing House. (in Ukrainian), P. 222.
6. Hryhorash O. V. (2023) Finansovi aspekty formuvannia rynku osvitnikh posluh v Ukraini na prykladi spetsialnosti 072 «Finansy, bankivska sprava ta strakhuvannia». [Financial aspects of the formation of the educational services market in Ukraine on the example of specialty 072 "Finance, banking and insurance"]. *Scientific notes of the National University "Ostroh Academy". Series "Economics"*. vol. 56. no. 28. pp. 52–57.
7. Trunina I. M., Priakhina K. A., Andriienko M. S. (2021) Tsinoutvorennia na rynku vyshchoi osvity Ukrainy. [Pricing on the higher education market of Ukraine]. *Efektivna ekonomika [Efficient economy]*. (electronic journal), no. 10. Retrieved from: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=9422>
8. Andrushchenko V. (2002) Ekonomika osvity rynkovo spriamovanoho suspilstva [Economics of education in a market-oriented society] *Vyshcha osvita Ukrainy*. no. 2. pp. 10–15.
9. Astakhova V.I. (2003) Naukovi doslidzhennia u pryvatnykh VNZ: pershi dosiahnennia, perspektyvy [Economics of education of a market-oriented society] *Vyshcha osvita Ukrainy*. no. 1. pp. 22–26.
10. Aftanaziv I.S. (2006) Analiz potreb meshkantsiv rehioniv u fakhivtsiakh iz vyshchoiu osvitoiu [Analysis of the needs of the residents of the regions for specialists with higher education]. *Visnyk NU «Lvivska politehnika» «Menedzhment ta pidpriemnytstvo: etapy stanovlennia i problemy rozvytku»*. Lviv: Publication of Lviv Polytechnic University,. no. 567. pp. 378–384.
11. Kostriченко V. M., Krasovska Yu. V. (2017) Metodichni osoblyvosti formuvannia tsin na platni posluhy vyshchykh navchalnykh zakladiv. [Methodological features of price formation for paid services of higher educational institutions]. *Економіка і суспільство*. no. 13. pp. 525–530.
12. Zhykharieva V. V., Poznanska I. V., Baryshnikova V. V. (2020) Metodyka analizu bezzbytkovosti osvitnikh posluh u marketynhovii diialnosti universytetu. [The method of analyzing the break-even of educational services in marketing activities of the university]. *Modern Economics*. [Modern Economics] (electronic journal), no. 23. pp. 62–68. Retrieved from: <https://doi.org/10.31521/modecon>.
13. Shashkevych O. (2007) Vartist osvitnikh posluh u vyshchykh navchalnykh zakladakh: modeliuвання optymalnoi tsiny. [The cost of educational services in higher education institutions: modeling the optimal price]. *Svit finansiv*. vol. 12. no. 3. pp. 112–119.
14. Kostenko I. S. (2020) Rol indykatyvnoi sobivartosti u formuvanni rynku osvitnikh posluh v Ukraini. [The role of indicative cost in the formation of the educational services market in Ukraine]. *Business Inform*. vol. 508. no. 5. pp. 295–305.

## ПУБЛІЧНЕ УПРАВЛІННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ

УДК 353:[330.341.1:332.14+338.2](477)

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.43>

С. А. ДЯЧЕНКО

доктор наук з державного управління, доцент,  
доцент кафедри регіональної політики  
Навчально-науковий інститут публічного управління та державної служби  
Київського національного університету імені Тараса Шевченка  
ORCID: 0000-0002-5905-4607

І. В. НАЗАРЕНКО

аспірант кафедри регіональної політики  
Навчально-науковий інститут публічного управління та державної служби  
Київського національного університету імені Тараса Шевченка  
ORCID: 0009-0003-5884-5356

### ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛІ TRIPLE HELIX ЯК ЧИННИКА СТИМУЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ІННОВАЦІЙНОГО ПІДПРИЄМНИЦТВА НА РЕГІОНАЛЬНОМУ РІВНІ

У статті проведено науково-практичне обґрунтування ефективності застосування моделі Triple Helix, як чинника стимулювання розвитку інноваційного підприємництва й підвищення конкурентоспроможності регіонів, і на цій основі розроблено напрями вдосконалення механізмів та інструментів її реалізації в контексті відновлення економіки України. Окреслено, що в сучасних дослідженнях з теорії інновацій та інноваційних систем все більше уваги приділяється аналізу тенденцій їх розвитку на основі новітніх підходів та моделей, які відповідним чином відображають взаємозв'язки між владою, наукою та бізнесом і корелюють із моделями потрійної спіралі та стратегічних інноваційних мереж. Досліджено концептуальні підходи до формування і розвитку моделі Triple Helix, наголошено на доцільності її реалізації на прикладі провідних країн світу. Також представлено позитивний досвід успішного впровадження такої моделі в деяких регіонах України. Доведено, що успішне впровадження моделі Triple Helix на регіональному рівні в Україні може сприяти подоланню системних проблем таких, як: недостатнє фінансування науки, слабка інфраструктура для стартапів, обмежений доступ до світових ринків тощо. Закцентовано, що Модель Triple Helix є перспективним інструментом для стимулювання розвитку інноваційного підприємництва на регіональному рівні в Україні, оскільки забезпечує тісну взаємодію між наукою, бізнесом і владою та створює сприятливі умови для притоку інвестицій. Наголошено, що для успішного впровадження цієї моделі необхідно активізувати співпрацю між усіма трьома суб'єктами, вдосконалити нормативно-правове регулювання, створити стимули для інвесторів та науковців, а також забезпечити доступ до необхідної інфраструктури. Зазначено, що органи державної влади та місцевого самоврядування (різних рівнів) мають відігравати провідну роль у координації цих процесів, всебічному розкритті потенціалу регіонів, підтримки їх конкурентних переваг, стимулюванні інноваційного підприємництва, що сприятиме відновленню та сталому економічному розвитку України.

**Ключові слова:** інноваційне підприємництво, модель Triple Helix, стимулювання інноваційного розвитку, публічно-приватне партнерство, відновлення економіки України, інфраструктура, регіональна політика, конкурентоспроможність, партнерство науки, бізнесу і влади.

S. A. DIACHENKO

Doctor of Sciences in Public Administration, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Regional Policy  
Educational and Scientific Institute of Public Administration and Civil Service  
of Taras Shevchenko National University of Kyiv  
ORCID: 0000-0002-5905-4607

I. V. NAZARENKO

Postgraduate Student at the Department of Regional Policy  
Educational and Scientific Institute of Public Administration and Civil Service  
of Taras Shevchenko National University of Kyiv  
ORCID: 0009-0003-5884-5356



## APPLICATION OF THE TRIPLE HELIX MODEL AS A FACTOR FOR STIMULATE THE DEVELOPMENT OF INNOVATIVE ENTREPRENEURSHIP AT THE REGIONAL LEVEL

The article provides a scientific and practical substantiation of the effectiveness of the Triple Helix model as a factor in stimulating the development of innovative entrepreneurship and increasing the competitiveness of regions, and on this basis, directions for improving the mechanisms and tools for its implementation in the context of the recovery of the Ukrainian economy are developed. It is outlined that in modern research on the theory of innovations and innovation systems, more and more attention is paid to the analysis of trends in their development based on the latest approaches and models that appropriately reflect the relationships between power, science and business and correlate with the models of the triple spiral and strategic innovation networks. Conceptual approaches to the formation and development of the Triple Helix model were studied, the expediency of its implementation on the example of the leading countries of the world was emphasized. The positive experience of successful implementation of such a model in some regions of Ukraine is also presented. It has been proven that the successful implementation of the Triple Helix model at the regional level in Ukraine can contribute to overcoming systemic problems such as: insufficient funding of science, weak infrastructure for startups, limited access to global markets, etc. It is emphasized that the Triple Helix Model is a promising tool for stimulating the development of innovative entrepreneurship at the regional level in Ukraine, as it ensures close interaction between science, business and government and creates favorable conditions for the inflow of investments. It was emphasized that for the successful implementation of this model, it is necessary to intensify cooperation between all three entities, improve regulatory and legal regulation, create incentives for investors and scientists, as well as ensure access to the necessary infrastructure. It is noted that state authorities and local self-government bodies (of different levels) should play a leading role in coordinating these processes, comprehensively revealing the potential of regions, supporting their competitive advantages, stimulating innovative entrepreneurship, which will contribute to the recovery and sustainable economic development of Ukraine.

**Key words:** innovative entrepreneurship, Triple Helix model, stimulation of innovative development, public-private partnership, recovery of the economy of Ukraine, infrastructure, regional policy, competitiveness, partnership of science, business and government.

### Постановка проблеми

Економіка України наразі потребує суттєвої модернізації та вироблення новітньої моделі свого розвитку на інноваційних засадах. Складні обставини воєнного часу, попри посилені ризики і загрози, вимагають негайного відновлення та відбудови всього зруйнованого російською агресією. Разом з тим, – це шанс здійснити структурні реформи, перейти від спеціалізації на виробництві аграрно-сировинної продукції до продукції переробної промисловості з високою доданою вартістю [9, с. 197]. Особлива роль у цьому належить інноваціям, які виступають діловим генератором підприємництва, дають науково-технічний, економічний та ринковий ефект. Чітке усвідомлення, що головним чинником конкурентоздатності країни є її спроможність генерувати нові знання і здійснювати їхню комерціалізацію у вигляді технологічних та продуктових інновацій, – стає ядром моделі інноваційного економічного розвитку. Тому серед першочергових реформаторських заходів є й трансформація інституцій, що сприяють розвитку знаннево-інноваційного потенціалу [1, с. 76].

Інноваційне підприємництво є ключовим фактором розвитку економіки в умовах війни та повоєнного відновлення. Механізм інноваційного підприємства є способом організації інновацій, сукупності спонукальних мотивів, економічних форм і методів управління системою нововведень, що складається під впливом ринкової кон'юнктури та державного регулювання [14, с. 65]. Шляхом створення нових технологій та продуктів, компанії можуть збільшувати свою конкурентоспроможність, підвищувати виробничу ефективність та підтримувати соціальний розвиток регіонів [2, с. 54].

Однією з ключових умов успішного розвитку інноваційного підприємництва є тісна співпраця між науковими установами, бізнесом та державою. В умовах глобальної конкуренції та швидких технологічних змін, українські регіони мають шукати ефективні способи стимулювання інноваційної діяльності. Однією з перспективних моделей, яка вже довела свою ефективність в інших країнах, є модель Triple Helix (потрійної спіралі). Вона передбачає інтеграцію науки, бізнесу та влади для створення сприятливих умов для розвитку інноваційного підприємництва, у тому числі на регіональному рівні.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідженням феномену підприємництва займалось багато вчених, серед яких відомі західні економісти А. Сміт, Ж.-Б. Сей, А. Маршал, Й. Шумпетер та ін. Тенденції розвитку інноваційного підприємництва висвітлено в зарубіжних дослідженнях М. Гіббонса, М. Кіна, К. Кристенсена, Ф. Махлупа, Р. Нельсона, М. Рейнора, Дж. Річі, С. Скотта, П. Трой, К. Фрімана, С. Хадсона, Г. Шварцмана та ін. Значний науковий внесок у дослідження проблематики інноваційного підприємництва, особливостей його функціонування і розвитку зробили вітчизняні учені: В. Базилевич, С. Білоус-Сергеєва, К. Богун, З. Варналій, Т. Васильців, В. Воротін, В. Геєць, А. Гойко, В. Гусєв, Б. Данилишин, О. Дацій, М. Долішній, Л. Лазебник, С. Мочерний, В. Небрат та ін.

Фундаментальні засади концепції Triple Helix закладені відомими вченими Г. Іцковіцем та Л. Лейдесдорфом, а сучасні дослідження цієї проблематики висвітлено в працях українських науковців: Ю. Бажала, А. Дуки, О. Єрмакова, М. Кравченко, І. Лимана, Г. Лопатіної, Ю. Нікітіна, М. Петрушенка, Ю. Рогозян, А. Попової О. Соколової, Н. Цибуляк, І. Чикаренко та ін.

Відаючи належне проведеним науковим дослідженням, на сьогодні архіважливим постає питання дослідження застосування моделі Triple Helix в Україні як прогресивного чинника стимулювання розвитку інноваційного підприємництва у контексті негайного і повоєнного відновлення регіонів, розробки новітніх дієвих механізмів та інструментів, а також прозорих алгоритмів вдосконалення взаємодії науки, бізнесу і влади з метою досягнення швидкого результату відбудови й сталого розвитку.

#### Формулювання мети дослідження

Метою статті є науково-практичне обґрунтування ефективності застосування моделі Triple Helix, як чинника стимулювання розвитку інноваційного підприємництва й підвищення конкурентоспроможності регіонів, і на цій основі розробка напрямів удосконалення механізмів та інструментів її реалізації в контексті відновлення економіки України.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Інноваційне підприємництво ґрунтується на використанні інновацій, новаторських ідей, технологій та підходів для створення нових продуктів, послуг або підприємств, об'єднує елементи підприємництва і творчості з метою вирішення проблем, задоволення потреб ринку та створення товарів з високою доданою вартістю на принципах сталого розвитку [5]. Сучасним та довготривалим трендом є зростання вагомості секторів з високим технологічним потенціалом таких, як: інформаційно-комунікаційні технології, біотехнології, зелена енергетика тощо. Це проявляється у збільшенні кількості стартапів та підприємств, спрямованих на розробку новаторських технологій та продуктів. Важливим є розширення екосистеми інноваційного підприємництва, яка включає у себе не лише бізнес-сектор, а й урядові структури, академічні установи, інкубатори та акселератори стартапів. Ця екосистема сприяє спільному розвитку технологій, обміну знаннями та залученню інвестицій [13].

Термін «економіка знань» був введений в обіг ще у 1960-х роках Фріцем Махлупом (Fritz Machlup), австрійським і американським економістом, автором книги «Виробництво й поширення знань у США», який розглядав його як один із секторів економіки. Іноді цей термін використовують як синонім інноваційної економіки. Проте сьогодні все більше дослідників визначають економіку знань як новий тип економіки, де ключову роль відіграють знання, а їхнє створення стає джерелом економічного зростання. Традиційно вважається, що процес інноваційного розвитку, який одночасно є передумовою та механізмом переходу до економіки знань, має дві основні складові: реалізацію інноваційних проєктів і наявність інноваційного потенціалу. Кожна з цих складових є складним і багатограним поняттям, що формує систему взаємопов'язаних елементів, які забезпечують її цілісність і єдність, – інноваційну систему. У сучасних дослідженнях з теорії інновацій та інноваційних систем все більше уваги приділяється аналізу тенденцій їх розвитку на основі нових підходів та моделей, які певним чином відображають взаємозв'язки між державою, наукою та бізнесом і корелюють із моделями потрійної спіралі та стратегічних інноваційних мереж.

Для подальшого обґрунтування підходу до управління інноваційним розвитком через проєкцію моделі потрійної спіралі (Triple Helix) слід детальніше розкрити її сутність та вплив на інноваційну систему. Прообразом потрійної спіралі можна вважати теоретико-філософське бачення форм самоорганізації та співробітництва в рамках еволюційної теорії. Основна ідея еволюційної теорії, яка лежить в основі концепції потрійної спіралі, полягає в інерційності траєкторій технологічного розвитку, що мають визначальний вплив на процеси економічного зростання. Траєкторія технологічного розвитку, що склалася у відповідний період, може вказувати на тип економічної та політичної систем: прихильники цієї теорії стверджують, що країни, технології яких спеціалізуються на виробництві товарів кінцевого споживання, мають демократичну та децентралізовану систему.

Ключові положення цієї теорії полягають у наступному:

- за певних умов інституційні та когнітивні структури стають нестійкими й неадаптованими до актуальної ситуації;
- розвиток цих структур (коеволуція) призводить до появи історично нових форм, які тимчасово вирішують проблеми невідповідності, складності та невизначеності в попередніх системах;
- час відіграє вирішальну роль у цьому динамічному процесі, але з його плином виникають нові невизначеності й труднощі, що супроводжуються новими невідповідностями (інституційними та когнітивними), породжуючи подальші цикли коеволуції.

Таким чином, інтерпретація цих положень у контексті ідеї потрійної спіралі може мати різноманітні значення. Модель потрійної спіралі організована відповідно до принципу перетину трьох множин відносин. Це описативна модель, яка визначає сукупність інституційних механізмів організації взаємовідносин між трьома динамічно відокремленими системами, які базуються на партнерстві або соціальному договорі. У цій моделі кожен з інститутів забезпечує виробництво знань шляхом створення комбінованих інституційних форм, що знижують

невизначеності та невідповідності. У науковій літературі найчастіше зустрічаються такі варіанти так званого триплексу: «наука – технологія – суспільство»; «наука – промисловість – природа»; «наука – економіка – уряд»; «наука – бізнес – держава» [3].

Концепція Triple Helix (моделі потрійної спіралі) була запропонована в 1990-х роках професором Нью-Йоркського, а пізніше Стенфордського університету Генрі Ітцковіцем (Henry Etzkowitz) і професором Амстердамського університету Лойстом Лейдесдорфом (Loet Leydesdorff) [4]. Саме таку потрійну взаємодію, що веде до безперервного створення інновацій, автори виявили у моделі функціонування американської Кремнієвої долини, технологічного центру, який відзначається значною щільністю високотехнологічних компаній (комп'ютери та їх комплектуючі, особливо мікропроцесори, програмне забезпечення, мобільний зв'язок, біотехнології тощо) та зосередженням провідних університетів. В основі моделі – теорія про домінуючі положення інституційних структур, відповідальних за створення нових знань (університетів), а також про важливість мережевого характеру взаємодії учасників інноваційного процесу в рамках стратегічних об'єднань, де відбувається перетин трьох суб'єктів взаємовідносин. Модель є горизонтальним підходом в інноваційній політиці, яка розглядається не стільки як ініціатива зверху, що виходить від уряду, скільки як кумулятивний результат взаємодії на різних рівнях (особливо на регіональному) органів управління, представників бізнесу, університетів, академічних кіл та недержавних організацій.

Г. Ітцовіц і Л. Лейдесдорф розглядають потрійну спіраль у контексті взаємодії між університетами, владою та бізнесом, акцентуючи увагу на важливості «локальних» особливостей «циркулярних» взаємодій і впливів (ефектів) потрійних спіралей: університети продукують ідеї, влада формує нормативну базу, бізнес забезпечує ресурсами. Потрійна спіраль символізує партнерство між владою, бізнесом і університетами, які є ключовими елементами інноваційної системи будь-якої країни [15, с. 55]. Університети створюють ідеї, влада розробляє нормативну базу, а бізнес надає ресурси. Потрійна спіраль символізує «союз» між владою, бізнесом та університетами, які є ключовими елементами інноваційної системи будь-якої країни [6, с. 106].

Таким чином, модель Triple Helix була розроблена для опису взаємодії трьох основних суб'єктів інноваційної діяльності: університетів, приватного сектора та держави. Успішне впровадження цієї моделі на регіональному рівні в Україні може сприяти подоланню системних проблем таких, як: недостатнє фінансування науки, слабка інфраструктура для стартапів, і обмежений доступ до світових ринків та ін. У цьому контексті виділяється вага роль кожного із трьох акторів:

1. Роль університетів. В умовах моделі Triple Helix університети виступають не лише як освітні заклади, але і як джерела інновацій та підприємницької активності. Вони можуть сприяти розвитку інновацій через комерціалізацію наукових досліджень, створення спін-офф компаній і стартапів, а також підготовку кадрів, здатних працювати в умовах сучасної інноваційної економіки. В Україні провідні університети вже працюють у цьому напрямі, але для більшого ефекту потрібна тісніша співпраця з бізнесом і державою та чітке унормування механізмів її процедур.

2. Роль бізнесу. Приватний сектор, в свою чергу, має бути зацікавлений у впровадженні новітніх технологій та інноваційних рішень, які можуть забезпечити конкурентні переваги на ринку. Бізнес може виступати як інвестор в перспективні інноваційні проекти, підтримувати наукові дослідження та розробки, а також сприяти створенню нових робочих місць у регіонах. В українських реаліях, особливо в контексті малого та середнього підприємництва, цей процес потребує підтримки з боку держави та університетів, щоб знизити рівень ризикованості (за рахунок державних та місцевих гарантій) та забезпечити сталість інноваційних ініціатив.

3. Роль держави. Держава відіграє ключову роль в створенні сприятливих умов для розвитку інноваційного підприємництва через регуляторні, фінансові та інфраструктурні інструменти. В Україні існує потреба у вдосконаленні законодавчої бази, створенні стимулів для бізнесу та наукових установ, а також у забезпеченні доступу до міжнародних програм фінансування та підтримки інновацій. Державна політика на регіональному рівні має бути спрямована на створення інноваційних кластерів, бізнес-інкубаторів та технопарків, що сприятиме розвитку інноваційного підприємництва.

Одним із вагомих засобів покращення стану інноваційної економіки України є забезпечення максимально швидкого розвитку суб'єктів малого і середнього підприємництва шляхом їх державної підтримки у сфері інновацій, науки (особливо в університетському середовищі) та промислового виробництва. До об'єктів інфраструктури підтримки малого і середнього підприємництва належать бізнес-центри, бізнес-інкубатори, інноваційні бізнес-інкубатори, науково-технологічні центри, центри трансферу технологій, фонди підтримки малого підприємництва, лізингові компанії, консультативні центри, інші підприємства, установи та організації, основним завданням яких є сприяння розвитку малого і середнього підприємництва. Державна підтримка включає фінансову, інформаційну, консультативну підтримку, у тому числі підтримку у сфері інновацій, науки і промислового виробництва, підтримку суб'єктів малого і середнього підприємництва, що провадять експортну діяльність, підтримку у сфері підготовки, перепідготовки і підвищення кваліфікації управлінських кадрів та кадрів ведення бізнесу [12].

Як свідчить світовий досвід, в контексті створення та розвитку технологічних парків, бажаний ефект можна досягти тільки при використанні університетської інфраструктури, що забезпечує постійну кадрову політику

і активно залучає до інноваційного процесу найбільш динамічну частину суспільства – студентську молодь, яка бажає досягти найвищих результатів кар’єрного зростання – в освіті, бізнесі та управлінні. Даний сектор є найбільш динамічним і потребує відносно малих капіталовкладень [10].

Варто відмітити, що в деяких регіонах України вже є позитивний досвід успішного впровадження моделі Triple Helix. Так, у Харкові активно функціонує кілька технопарків і бізнес-інкубаторів, що співпрацюють із місцевими університетами та підприємствами. Зокрема, Перший інноваційний парк у Східній Україні, – місце, де створюються екосистема та інфраструктура для розвитку бізнесу у сфері високих технологій та креативних індустрій. Місією цього парку є створення інноваційного середовища для розвитку харківського ком’юніті інноваторів, IT та креативного підприємництва, перетворюючи місто у провідний інноваційний центр України. Інноваційний парк пропонує: пошук талантів, клієнтів і партнерів; івент-сервіс; програми посилення стартапів і бізнес-консультування; R&D лабораторії; бізнес-тури Україною і за кордон; безкоштовні експертні консультації; PR-підтримку; оренда офісів на гнучких умовах на будь-який період часу тощо. Це сприяє розвитку інноваційних проєктів та створенню нових робочих місць у регіоні [11].

Інший успішний приклад активної співпраці наукових установ, бізнесу та місцевої влади – Львівський IT кластер, місією якого є сприяння перетворенню Львова та України в інноваційний та інвестиційно привабливий технологічний центр світового рівня. Діяльність його полягає у створенні сприятливих умов для ведення бізнесу через покращення якості освіти, розвиток талантів, різносторонню підтримку техкомпаній та адвокацію інтересів індустрії. Впродовж 10 років Львівський IT кластер реалізує освітні, промоційні, інфраструктурні та дослідницькі проєкти, які покращують бізнес-екосистему Львова, підвищують рівень освіти та створюють робочі місця. Спільнота, побудована на принципах соціальної відповідальності, розвиває технологічну галузь в Україні разом з представниками влади та освіти [8].

За принципами моделі Triple Helix в Україні працює «Науковий парк Київський університет імені Тараса Шевченка», місія цієї корпорації – просування та комерціалізація інтелектуальних R&D і технологічних проєктів, що спрямовано на розвиток і покращення відносин між наукою та бізнесом в Україні та світі. На сьогодні в цьому науковому парку створені сприятливі стартові умови для молодих вчених, що планують відкрити свої стартап компанії та зайнятись підприємницькою діяльністю у сфері високих технологій. Науковий парк займається комерціалізацією перспективних інноваційних проєктів українських вчених у галузі природничих наук, технології матеріалів, приладобудування та інформаційних технологій (IT). Законодавчими пільгами є: відсутність ввізного мита на імпортне обладнання для виконання проєктів парку та пільги по наданню в оренду приміщень [10].

Також в Україні працює науковий парк «Київська політехніка», за юридичною формою – корпорація. Це платформа для перетворення наукових досягнень в інноваційні рішення та середовище для просування наукомістких технологій шляхом об’єднання наукових і виробничих потужностей на базі КПІ ім. Ігоря Сікорського з міжнародними та українськими високотехнологічними компаніями та інвесторами. Пріоритетними напрямками діяльності є: нові технології виробництва матеріалів, їх оброблення і з’єднання, створення індустрії наноматеріалів та нанотехнологій; технологічне оновлення та розвиток агропромислового комплексу; нові технології та обладнання для якісного медичного обслуговування, лікування, фармацевтики; технології високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- і суднобудування, озброєння; розвиток сучасних інформаційних, комунікаційних технологій, робототехніки; технології транспортування енергії, впровадження енергоефективних ресурсозберігаючих технологій та альтернативних джерел енергії [9].

Щодо індустріальних парків, то, станом на сьогодні, у Львівській області зареєстровано 15 індустріальних парків, у Київській області – 12. Це найбільша мережа по регіонах України, яка може стати локомотивом інноваційного розвитку. Пріоритетом є підтримка інноваційно орієнтованих секторів економіки, які надають поштовх модернізації та техніко-технологічному переоснащенню промислових підприємств, розвитку наукомістких, енерго- та екологічно ефективних і високотехнологічних виробництв. Зусилля місцевих органів влади мають бути зосереджені на підвищенні інноваційної складової діяльності індустріальних парків з фокусом на напрямки smart спеціалізації та з використанням сучасних інструментів інноваційної політики, зокрема, у рамках впровадження моделі взаємовигідного партнерства потрійної спіралі «місцеві органи влади – бізнес – наука» [7, с. 198].

Отже, для забезпечення успішного і ефективного розвитку інноваційного підприємництва необхідними є наступні чинники: 1) наявність розвинутої інноваційної системи, відповідної нормативної бази та належної інноваційної культури, що є формальними ознаками, які вказують на дотримання необхідних умов успішності інноваційного розвитку; 2) наявність системи налагоджених взаємозв’язків і відносин між інститутами, що входять до інноваційної системи, які забезпечують трансінституціональний та синергетичний ефект і є суб’єктами управління інноваційним розвитком, що вказує на наявність достатніх умов.

Для досягнення бажаного результату інноваційного розвитку України, враховуючи сучасні складні умови воєнного стану та необхідності негайної і повної відбудови, саме застосування моделі Triple Helix є ефективним чинником такої реалізації. Тісна взаємодія науки, бізнесу і влади є дієвим інструментом стимулювання

розвитку інноваційного підприємництва на регіональному рівні. Застосування цієї моделі є доцільним для вирішення архіважливих проблем і потреб, особливо на постконфліктних (деокупованих) територіях України шляхом створення, адаптації і розвитку індустріальних й технопарків, бізнес-інкубаторів, потужних інноваційно-інвестиційних хабів тощо.

Одним із основних інструментів, який може сприяти інноваційному розвитку в повоєнний період, є створення та розширення мережі бізнес-інкубаторів та акселераторів. Ці інституції повинні бути спрямовані на підтримку нових стартапів, які розробляють інноваційні рішення в різних галузях, включаючи будівництво, енергетику, охорону здоров'я, екологію та інші сектори, що потребують відновлення. В умовах війни важливо забезпечити умови для швидкого утворення і функціонування суб'єктів господарювання, здатних швидко адаптуватися до мінливих умов ринку і підвищеної ризиковості, зокрема шляхом державної підтримки підприємництва в регіонах, що зазнали найбільших руйнувань.

Технопарки можуть стати ключовими елементами для розвитку інноваційної інфраструктури в регіонах, постраждалих від війни. Вони сприятимуть залученню інвестицій, створенню робочих місць та розвитку нових технологій. Важливо, щоб технопарки були створені на основі механізму публічно-приватного партнерства, в межах якого держава забезпечує сприятливі умови для їх розвитку, а приватний сектор бере на себе функції з фінансування та менеджменту. Крім того, технопарки можуть стати майданчиками для співпраці між науковими установами, бізнесом та урядом з метою розробки нових технологій і продуктів для відновлення критичної інфраструктури.

Впровадження спеціальних економічних зон у регіонах, які найбільше постраждали від війни, зі спрощеними умовами ведення бізнесу, пільговим оподаткуванням та особливими умовами для залучення іноземних інвесторів є одним із стимулювальних механізмів розвитку інноваційного підприємництва в Україні. Вагомим чинником стимулювання інноваційно-інвестиційної діяльності та залучення іноземного капіталу є створення певних преференційних умов на окремих територіях.

Особливе місце серед інструментів державної інвестиційної та інноваційної політики посідають спеціальні правові режими економічної діяльності, що передбачають застосування для частини суб'єктів господарювання впродовж визначеного часу особливих, більш преференційних умов діяльності, особливо на проблемних (депресивних) територіях у контексті їх реанімації та відновлення галузей. Доцільним є застосування різноманітних фінансових інструментів для стимулювання розвитку підприємництва, таких як гранти, субсидії, податкові пільги, державні гарантії, кредити для стартапів та компаній, що займаються інноваційною діяльністю тощо. Важливим є розробка відповідних освітніх навчальних програм із підготовки професійних кадрів та курсів підвищення кваліфікації у сфері інноваційного підприємництва, сучасних технологій, інжинірингу та управління проектами відбудови та регіонального розвитку в Україні.

Для зниження рівня невизначеності, фрагментарності та ситуативності у процесах повоєнного відновлення доцільним вбачається створення сучасних комбінованих інституційних форм, що забезпечуватимуть ефективну взаємодію науки, бізнесу і влади. Йдеться про спеціалізовані науково-дослідні інституції, об'єднані з бізнесовими організаціями та державними установами, що працюють разом над розробкою нових технологічних рішень у контексті відбудови. Зокрема, створення спільних дослідницьких інноваційних центрів на базі університетів і підприємств із досліджень, розробки та тестування нових продуктів й технологій для інфраструктурної та інших сфер, є важливим напрямом. Результатом такої взаємодії є розробка та впровадження новітніх інструментів цифрової та «зеленої» економіки (Smart City, альтернативна енергетика, діджитал платформи тощо). Зрозуміло, що застосування моделі Triple Helix має супроводжуватися удосконаленням і розвитком нормативно-правової бази, яка чітко регламентує умови, процедури та алгоритми такої взаємодії.

### Висновки

Застосування моделі Triple Helix є перспективним чинником стимулювання розвитку інноваційного підприємництва на регіональному рівні в Україні, що забезпечує тісну взаємодію науки, бізнесу і влади та створює сприятливі умови і мультиплікаційний ефект зростання обсягу виробництва та сприяє підвищенню рівня конкурентоспроможності національної економіки. Інноваційність є одним із ключових принципів розвитку підприємництва в умовах післявоєнного відновлення економіки регіонів і країни. Виклики сьогодення зобов'язують вибудовувати нову систему взаємовідносин науки, бізнесу і влади, осмислити філософію необхідності тісної співпраці та партнерства на засадах створення рівних можливостей для регіонів, розробляти дієві механізми та інструменти державного стимулювання розвитку інноваційного підприємництва, удосконалювати нормативно-правове поле та забезпечувати партиципативність у прийнятті суспільно-значущих управлінських рішень.

Для розвитку інноваційного підприємництва на основі моделі Triple Helix необхідно: активізувати співпрацю між усіма трьома суб'єктами (наукою, бізнесом і владою) на регіональному рівні; створити відповідні умови та забезпечити доступ до необхідної інфраструктури й ресурсів; розробити дієві стимули для зацікавленості інвесторів (як внутрішніх, так і зовнішніх), науковців, дослідників, топ-менеджерів та IT-спеціалістів; розробити, вдосконалити, уніфікувати нормативно-правові документи, у тому числі на предмет надання відповідних гарантій та

страхування воєнних ризиків; запровадити антикорупційні запобіжники для ведення бізнесу і приватних інвестицій та ін.

Розробка інноваційних механізмів, інструментів, алгоритмів та методик для успішної реалізації окреслених заходів є важливими перспективними напрямками подальших наукових досліджень та практичного втілення. Органи державної влади та місцевого самоврядування (різних рівнів) мають відігравати провідну роль у координації цих процесів, всебічному розкритті потенціалу регіонів, підтримки їх конкурентних переваг, стимулюванні інноваційного підприємництва, що сприятиме відновленню та сталому економічному розвитку України.

### Список використаної літератури

1. Бажал Ю. М. Розвиток інноваційної діяльності у знаннєвому трикутнику «держава – університети – промисловість». *Економіка і прогнозування*. № 2015/1. С. 76-88. URL : [http://eip.org.ua/?page\\_id=523&aid=575](http://eip.org.ua/?page_id=523&aid=575)
2. Білоус-Сергєєва, С. (2023). Інноваційне підприємництво як ключовий фактор розвитку регіону у післявоєнний період. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Економічні науки*, (1(38)). С. 50-55. [https://doi.org/10.31498/2225-6725.1\(38\).2023.280738](https://doi.org/10.31498/2225-6725.1(38).2023.280738)
3. Дейнеко Л. В. Напрями та механізми реконструкції промислового сектора України. Реконструктивний економічний розвиток: основні напрями, ефективність і соціальна справедливість: монографічний збірник / за ред. акад. НАН України Гейця В. М., чл.-кор. НАН України Гриценка А. А.; НАН України, ДУ “Ін-т екон. та прогноз. НАН України”. Київ, 2016. С. 60-67. URL : <http://ief.org.ua/docs/scc/2.pdf>
4. Єгоров Ігор. «Потрійна спіраль» у МОНівській інтерпретації. *Дзеркало тижня*. 09.08.2023. URL : [https://zn.ua/ukr/science/potriyna-spiral-u-monivskiy-interpretaciyi-\\_html](https://zn.ua/ukr/science/potriyna-spiral-u-monivskiy-interpretaciyi-_html)
5. Ірина М. Вахович, Олена М. Лютак, Надія В. Ковальчук. Особливості розвитку інноваційного підприємництва в Україні в сучасних умовах. *Актуальні проблеми економіки*. № 8 (266), 2023. С. 65-73.
6. Климчук О. В. Сучасні тенденції державного управління інноваційною діяльністю в Україні. *Імперативи економічного зростання в контексті реалізації глобальних цілей сталого розвитку* : тези доповідей III Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції, м. Київ, 10 червня 2022 року. В 2-х т. Т. 1. Київ : КНУТД, 2022. С. 106-109. URL : <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/20387>
7. Лазебник Л. Л., Соколова О. М. Модель Triple Helix як інструмент підвищення інноваційної складової діяльності індустриальних парків. *Економічні перспективи підприємництва: виклики воєнного часу та повоєнної відбудови: збірник матеріалів VII Міжнародної науково-практичної конференції*, м. Ірпінь, 31 травня 2024 р. – Ірпінь : Державний податковий університет, 2024. – 628 с. С. 197-201.
8. Львівський ІТ кластер. URL : <https://itcluster.lviv.ua/pro-klasters/>
9. Науковий парк «Київська політехніка». URL : <https://scipark.kpi.ua/>
10. Науковий парк Київський університет імені Тараса Шевченка. URL : <https://scp.knu.ua/ua/pro-korporatsiiu>
11. Перший інноваційний парк у Східній Україні. URL : <https://kharkiv.unit.city/about-park/>
12. Про розвиток та державну підтримку малого і середнього підприємництва в Україні (із змінами). Закон України від 22 берез. 2012 р. № 4618-VI. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4618-17#Text>
13. Рибак, М. (2024). Інноваційне підприємництво як ключова ознака сталого розвитку. *Економіка та суспільство*, (59). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-59-153>
14. Сизоненко В. О., Овчаренко Л. В. Інноваційне підприємство – форма реалізації інтелектуальної власності. *Наукові записки*. Том 18. Економічні науки. С. 64-72. URL : <https://ekmair.ukma.edu.ua/server/api/core/bitstreams/bd57e140-4ba5-4066-8674-51a39a4c28fc/content>
15. Чикаренко І. А. Підхід до управління інноваційним розвитком на основі моделі потрійної спіралі. *Держава та регіони. Серія: Державне управління*. 2014. № 1 (45). С. 54-62. URL : <http://pa.stateandregions.zp.ua/issue-1-2014?id=1653>

### References

1. Bazhal Ju. M. (2015) Rozvytok innovacijnoji dijalnosti u znannjevomu trykutnyku «derzhava – universytety – promyslovistj» [Development of innovative activity in the knowledge triangle "state – universities – industry"]. *Ekonomika i proghnozuvannja*. # 1. S. 76-88. URL : [http://eip.org.ua/?page\\_id=523&aid=575](http://eip.org.ua/?page_id=523&aid=575) [in Ukrainian]
2. Bilous-Serghjejeva, S. (2023). Innovacijne pidprijemnyctvo jak ključovyj faktor rozvytku reghionu u pisljavojenyj period [Innovative entrepreneurship as a key factor in the development of the region in the post-war period]. *Visnyk Pryazovskjogho Derzhavnogho Tekhnichnogho Universytetu*. Serija: Ekonomichni nauky, (1(38)). S. 50-55. [https://doi.org/10.31498/2225-6725.1\(38\).2023.280738](https://doi.org/10.31498/2225-6725.1(38).2023.280738) [in Ukrainian]
3. Dejneko L. V. (2016). Naprjamy ta mekhanizmy rekonstrukciji promyslovogho sektora Ukrajiny. *Rekonstruktyvnyj ekonomichnyj rozvytok: osnovni naprjamy, efektyvnistj i socialjna spravedlyvistj* [Directions and mechanisms of reconstruction of the industrial sector of Ukraine]: monoghrfichnyj zbirnyk / za red. akad. NAN Ukrajiny Ghejcja V. M.,

chl.-kor. NAN Ukrainy Ghrycenka A. A.; NAN Ukrainy, DU "In-t ekon. ta proghnozuv. NAN Ukrainy". Kyjiv, S. 60-67. URL : <http://ief.org.ua/docs/scc/2.pdf> [in Ukrainian]

4. Jeghorov Ighor. (2023) «Potrijna spiralj» u MONivskij interpretaciji ["Triple spiral" in the MES interpretation]. Dzerkalo tyzhnja. 09.08.2023. URL : [https://zn.ua/ukr/science/potriyna-spiral-u-monivskiy-interpretaciyi\\_.html](https://zn.ua/ukr/science/potriyna-spiral-u-monivskiy-interpretaciyi_.html) [in Ukrainian]

5. Iryna M. Vakhovych, Olena M. Ljutak, Nadija V. Kovalchuk. (2023) Osoblyvosti rozvytku innovacijnogho pidpryjemnyctva v Ukraïni v suchasnykh umovakh [Features of the development of innovative entrepreneurship in Ukraine in modern conditions]. Aktualjni problemy ekonomiky. # 8 (266). S. 65-73. [in Ukrainian]

6. Klymchuk O. V. (2022) Suchasni tendenciji derzhavnogho upravlinnja innovacijnoju dijajnistju v Ukraini [Modern trends of state management of innovative activities in Ukraine]. Imperatyvy ekonomichnogho zrostantja v konteksti realizaciji globalnykh cilej stalogho rozvytku : tezy dopovidej III Mizhnarodnoji nauko-vo-praktyčnoji Internet-konferenciji, m. Kyjiv, 10 chervnja 2022 roku. V 2-kh t. T. 1. Kyjiv : KNUTD, S. 106-109. URL : <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/20387> [in Ukrainian]

7. Lazebnyk L. L., Sokolova O. M. (2024). Modelj Triple Helix jak instrument pidvyshhennja innovacijnoï skladovoï dijajnosti industrialnykh parkiv [The Triple Helix model as a tool for increasing the innovative component of industrial parks]. Ekonomichni perspektivy pidpryjemnyctva: vyklyky vojennogho chasu ta povojennoï vidbudovy: zbirnyk materialiv VII Mizhnarodnoï nauko-vo-praktyčnoï konfe- rencii, m. Irpinj, 31 travnja 2024 r. – Irpinj : Derzhavnyj podatkovyj universytet, 2024. – 628 s. S. 197-201. [in Ukrainian]

8. Lvivskij IT klaster [Lviv IT cluster]. URL : <https://itcluster.lviv.ua/pro-klaster/> [in Ukrainian]

9. Naukovyj park «Kyïvsjka politehnika» [Science Park "Kyiv Polytechnic"]. URL : <https://scipark.kpi.ua/> [in Ukrainian]

10. Naukovyj park Kyjivskij universytet imeni Tarasa Shevchenka [Taras Shevchenko Kyiv University Science Park]. URL : <https://scp.knu.ua/ua/pro-korporatsiiu> [in Ukrainian]

11. Pershyj innovacijnyj park u Skhidnij Ukraini [The first innovation park in Eastern Ukraine]. URL : <https://kharkiv.unit.city/about-park/> [in Ukrainian]

12. Pro rozvytok ta derzhavnu pidtrymku malogho i serednjogho pidpryjemnyctva v Ukraini (iz zminamy) [On the development and state support of small and medium-sized enterprises in Ukraine (with changes)]. Zakon Ukrainy vid 22 berez. 2012 r. # 4618-VI. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4618-17#Text> [in Ukrainian]

13. Rybak, M. (2024). Innovacijne pidpryjemnyctvo jak ključova oznaka stalogho rozvytku [Innovative entrepreneurship as a key feature of sustainable development]. Ekonomika ta suspiljstvo, (59). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-59-153> [in Ukrainian]

14. Syzonenko V. O., Ovcharenko L. V. Innovacijne pidpryjemstvo – forma realizacii intelektualnoï vlasnosti [Innovative enterprise – a form of realization of intellectual property]. Naukovi zapysky. Tom 18. Ekonomichni nauky. S. 64-72. URL : <https://ekmair.ukma.edu.ua/server/api/core/bitstreams/bd57e140-4ba5-4066-8674-51a39a4c28fc/content> [in Ukrainian]

15. Chykarenko I. A. (2014). Pidkhid do upravlinnja innovacijnym rozvytkom na osnovi modeli potrijnoji spirali [Approach to management of innovative development based on the triple spiral model]. Derzhava ta rehiony. Serija: Derzhavne upravlinnja. #1 (45). S. 54-62. URL : <http://pa.stateandregions.zp.ua/issue-1-2014?id=1653> [in Ukrainian]

**Н. М. КОВАЛЬСЬКА**

кандидат педагогічних наук, доцент,  
доцент кафедри державного управління і місцевого самоврядування  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-5758-8373

**В. М. ДЕМЧЕНКО**

кандидат філологічних наук, доцент,  
доцент кафедри державного управління і місцевого самоврядування  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0003-1841-7798

## УПРАВЛІНСЬКИЙ КОНФЛІКТ І МЕДІАЦІЯ ЯК ЗАСІБ ЙОГО ВИРІШЕННЯ

*У статті з метою дослідити особливості конфлікту в публічному управлінні та застосування для його вирішення методу медіації розглянуто сутність конфлікту в організації, сутність медіації, її учасники, складові, етапи, її дихотомічну природу та специфіку використання у процесі розв'язання конфлікту в публічному управлінні. З'ясовано, що конфлікт має подвійну природу – негативні наслідки, що в умовах організації роз'єднують колектив, створюють деструктивну атмосферу; та позитивні, що виявляються в згуртуванні колективу управлінців задля вирішення складної проблеми, тобто створюють уже конструктивну атмосферу. Тобто медіація передбачає колективне ухвалення рішення з правильним вибором його варіанту, що буде загальноприйнятним для сторін суперечки. Важливою визначається й роль керівника установи.*

*Зроблено висновки, що для вирішення конфлікту в управлінській організації, зокрема у процесі ухвалення управлінського рішення, потрібні позитивні риси медіації – згуртування колективу, спільна діяльність, розвиток самосвідомості й розуміння інших. При цьому рішення ухвалюються як колективно, так і з участю керівника установи. У демократичному світі медіація давно відома як метод позасудового розв'язання конфліктів, що передбачає добровільну згоду суб'єктів суперечки саме на використання медіації, вільне обрання ними посередника-медіатора, їхню співпрацю задля досягнення загальноприйнятого рішення. Тому в Україні також потрібно впроваджувати медіацію, адже вона є простою та зручною для суб'єктів, може бути припинена ними в будь-який момент. У публічному управлінні за допомогою колективного обговорення вирішуються загальні проблеми, ухвалюються відповідні рішення, що можуть впливати не лише на діяльність окремої адміністративної установи, але й на імідж держави загалом.*

**Ключові слова:** медіація, конфлікт, суперечка, публічне управління, угода, перемовини, медіатор, сторона, керівник.

**N. M. KOVAL'S'KA**

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Public Administration  
and Local Self-Government  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0002-5758-8373

**V. M. DEMCHENKO**

Candidate of Philological Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Public Administration  
and Local Self-Government  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0003-1841-7798

## MANAGEMENT CONFLICT AND MEDIATION AS A MEANS OF ITS RESOLUTION

*In order to investigate the specifics of conflict in public administration and the application of the mediation method for its resolution, the article examines the essence of conflict in the organization, the essence of mediation, its participants, components, stages, its dichotomous nature and the specifics of its use in the process of conflict resolution in public administration. It was found that the conflict has a double nature – negative consequences that in the conditions of the organization separate the team, create a destructive atmosphere; and positive, which are manifested in the unity of a team of managers to solve a complex problem, that is, they create an already constructive atmosphere. That is, mediation involves collective decision-making with the correct choice of its option, which will be generally acceptable to the parties to the dispute. The role of the head of the institution is also defined as important.*



*It was concluded that to resolve the conflict in the management organization, in particular, in the process of making a management decision, positive features of mediation are needed – team cohesion, joint activity, development of self-awareness and understanding of others. At the same time, decisions are made both collectively and with the participation of the head of the institution. In the democratic world, mediation has long been known as a method of out-of-court conflict resolution, which involves the voluntary consent of the parties to the dispute precisely to the use of mediation, their free choice of a mediator-mediator; their cooperation in order to reach a generally acceptable solution. Therefore, it is also necessary to introduce mediation in Ukraine, because it is simple and convenient for the subjects, it can be terminated by them at any time. In public administration, with the help of collective discussion, general problems are solved, appropriate decisions are made, which can affect not only the activity of a separate administrative institution, but also the image of the state in general.*

**Key words:** mediation, conflict, dispute, public administration, agreement, negotiations, mediator, party, manager.

### Постановка проблеми

У сучасному світі, що все більше відповідає засадам гуманізму, вирішення конфлікту стає головною вимогою як на внутрішньодержавному рівні, так і на зовнішньому. На жаль, залишаються ще прояви силового вирішення, що переростають у воєнні протистояння, але на внутрішньому рівні держави намагаються знизити рівень конфліктогенності (говоримо, звісно, про демократичні). Зокрема, у межах правової системи постійно відбувається пошук альтернатив судовому розгляду з його імперативним характером, адже не всі правові суперечки є проблемними для їх вирішення. Передовий світ для таких ситуацій виробив метод медіації, коли сторони конфлікту з допомогою посередника розв'язують своє протистояння вільно – без зовнішнього впливу та імперативних рішень суду. Україна також не стоїть осторонь цього процесу: від 16 листопада 2021 року ухвалено Закон України «Про медіацію» [1], де визначено всі важливі положення для впровадження цього методу, що має всі ознаки демократичного устрою життя.

У системі управління, де існують усі чинники, що можуть призвести до конфлікту, – колектив працівників, керівник, система посад й оплати праці, таке принципове протистояння реальне з різних мотивів – як об'єктивних, так і суб'єктивних. Проте організаційний конфлікт виявляє дихотомію: традиційним є негативний бік, що характеризується деструктивними ознаками (наприклад, роз'єднанням колективу), та новаційний позитивний (характеризується конструктивними ознаками – наприклад, об'єднанням колективу). Тобто маємо прямо протилежні результати одного явища.

Що ж стосується використання медіації у внутрішніх організаційних суперечках, то медіатором формально може бути керівник, який найбільше зацікавлений у сталості колективу й неконфліктній атмосфері. Проте тут вирішується таке протистояння колективно, тобто відбувається своєрідна колективна медіація, що згуртовує той колектив у прагненні вирішити проблемне питання, яке загалом стосується всієї організації.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання та проблеми, що пов'язані з наданням адміністративних послуг громадянам, аналізуються вченими в галузях публічного управління, адміністративного права, психології та конфліктології, адже правові й інші суперечки, що виникають у галузі управління, як і в будь-якій іншій організації, потребують негайного свого розв'язання, для чого підходить такий альтернативний метод, як медіація. Для такого комплексного аналізу ми використали праці з психології управління – О. Гури та Т. Гури (дослідили як теорію конфлікту, так і його специфіку в управлінській структурі) [2], Л. Мотозюк (розглянула особливості ухвалення рішень у конфліктних ситуаціях) [3], В. Боковець та В. Соколовської (проаналізували конфліктні ситуації в кадровій роботі) [4]; із теорії медіації – Н. Дараганової (з'ясувала роль медіації у вирішенні трудових суперечок) [5], М. Лазаренка (дослідив міжнародний досвід упровадження медіації) [6], із практичного застосування медіації – І. Лях (вивчала особливості впровадження медіації для вирішення трудових конфліктів) [7], з упровадження медіації в Україні – А. Біцай (розглянула перспективи цього методу в Україні) [8], Н. Мазаракі (здійснила комплексне дослідження медіації, зокрема з перспективами її імплементації в Україні) [9]. Проте попри такий всеохопний аналіз методу медіації, зокрема у процесі вирішення конфліктів, не достатньо дослідженим залишається питання застосування його в публічному управлінні, де також відбуваються конфлікти.

### Формулювання мети дослідження

Мета – дослідити особливості конфлікту в публічному управлінні та застосування методу медіації для вирішення такого конфлікту. Для досягнення цієї мети поставлено вирішити такі завдання: з'ясувати сутність конфлікту в організації, сутність медіації та її дихотомічну природу, специфіку використання медіації для вирішення конфлікту в публічному управлінні.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Конфлікт у науковому дискурсі визначається як протистояння певних суб'єктів з метою реалізації кожним із них своїх інтересів і поглядів. Уніфікована структура конфлікту передбачає такі його компоненти: суб'єкти, умови та предмет конфлікту, дії суб'єктів, передбачувані результати. Якщо враховувати динаміку протистояння, то визначаються етапи виникнення такої ситуації, усвідомлення її як конфліктної, власне конфлікт, вирішення

його. О. Гура та Т. Гура також додають сюди психологічні характеристики – напруженість, непорозуміння, ворожість, дискомфорт. За видами, це внутрішньоособисті, міжособисті, між особою та групою, внутрішньогрупові, міжгрупові, міжорганізаційні конфлікти; відкриті та приховані конфлікти; короткочасні та тривалі конфлікти; об'єктивно зумовлені та суб'єктивно зумовлені; вертикальні та горизонтальні конфлікти [2, с. 109–110].

Причинами конфлікту уніфіковано визначається невідповідність позицій його сторін. Тобто, якщо поведінка певного працівника суперечить поглядам іншого чи всього колективу, це може перетворитися в деструктивну (конфліктну) ситуацію, адже можуть постраждати в такому разі колективні інтереси й корпоративні цінності (наприклад, імідж організації). Це негативний бік (вимір) конфлікту. З іншого боку, вирішення проблемної ситуації, що має таке важливе значення для корпорації (й управлінської зокрема), відбувається через згуртування колективу, який ефективно протистоїть проблемі чи й окремому суб'єкту (фізичному чи юридичному). В. Боковець та В. Соколовська зазначають, що означена вище деструкція може призвести до загострення ситуації, емоційно напруженої атмосфери в колективі, погіршення комунікації тощо, адже й етимологічно поняття «конфлікт» визначається як зіткнення, протиборство, незгода між суб'єктами [4].

О. Гура та Т. Гура також відзначають цю дихотомію – негативний і позитивний характер конфлікту, де перша ознака відзначається деконструктивними атрибутами (погіршення психологічної атмосфери в колективі, пріоритетність конкурентного типу відносин, уникнення спільної діяльності тощо), друга – конструктивними (позитивні зміни в колективі – об'єднання та згуртування, зниження дискомфорту, розвиток самосвідомості, краще розуміння себе й інших, поява нової інформації, стимулювання до розвитку). Проте такі конструктивні особливості мають регулюватися всіма працівниками, зокрема й сторонами протиборства [2, с. 110].

Учені диференціюють конфлікти в організації за такими їх причинами:

- розподілення статусних посад (невідповідність наявних місць прагненням працівників, однобічна відповідальність нижчих ланок управління перед вищими);
- організаційна дисфункція (протистояння структурної статичності, сталості зі змінністю зовнішнього стану, до чого треба бути постійно готовими);
- недосконала оптимізація управлінської системи (неадекватний поділ праці між працівниками, а тому неадекватна рольова структура);
- порушення формальних і неформальних корпоративних норм (невідповідність можливих відхилень від декларованих норм поведінки);
- неадекватна система оплати праці й санкцій (розбіжності між прийнятою в організації системою та особистими сподіваннями працівників);
- неузгодженості в системі розроблення, ухвалення й реалізації управлінських рішень (зіткнення позицій, поглядів у процесі вибору альтернативних варіантів рішень);
- інформаційні проблеми (неповнота, суперечливість інформації, недостатність зворотнього зв'язку в комунікації) [2, с. 111–112].

Отже, як проміжний висновок щодо конфліктів в організації можна зазначити, що їх специфіка полягає у внутрішньоструктурному характері, визначена управлінськими функціями та спричинена відповідними способами діяльності. Тобто це суперечка між працівниками, керівником і виконавцями, різними підрозділами тощо з причин саме управлінської діяльності. Звісно, й такі суперечки можуть виникати як з об'єктивних причин (зумовлені фаховою діяльністю), так і з суб'єктивних (зумовлені особистісними мотивами) [2, с. 111]. Іншими словами, сам характер управлінської установи, де працює колектив особистостей високого освітнього й фахового рівня, уже передбачає потенційні конфлікти – суперечки з виробничих й інших питань, які мають вирішуватися негайно керівником або колегіально на зборах колективу, особливо коли такі конфлікти стосуються загальної для організації проблеми.

Переходячи до розгляду медіації як методу вирішення конфліктів, зазначимо, що вченими визначаються такі її ознаки: перемовини з допомогою нейтрального посередника-медіатора для досягнення суб'єктами конфлікту угоди, що їх влаштовує; процес, за допомогою якого суб'єкти конфлікту прагнуть самостійно, добровільно досягти згоди в конфлікті за допомогою медіатора; урегулювання конфлікту з узгодженням інтересів сторін й участю нейтрального учасника-посередника; процес перемовин, у якому посередник веде процес, аналізує аргументацію сторін і допомагає їм самостійно ухвалити загальноприйнятне рішення [6, с. 109–110]. За словами І. Лях, медіація є позасудовим методом вирішення суперечок, урегулювання конфліктів із допомогою посередника-медіатора [7, с. 138].

М. Лазаренко, проаналізувавши досвід упровадження процесів медіації в розвинених країнах світу, зазначає про його початок лише наприкінці минулого століття. Хоча посередники у процесі вирішення конфліктів (зокрема торгових і спадкових) використовувалися ще у давніх Вавилоні, Греції та Римі, і зрештою за ним закріпився термін «медіум» (лат. *medium*), надалі – «медіатор» (*mediator*) саме зі значенням «посередник». У свою чергу термін «медіація» походить від *mediate* («бути посередником»), тобто передбачає більшою мірою дію. Саме в США та Великій Британії її було введено через причини звантаженості судової системи в цих країнах і потребу віднайдіння якихось інновацій у судовій діяльності. Медіація відразу довела свою ефективність і почала поширюватися

світом. Сьогодні вона активно використовується також у Канаді, Австралії, Нідерландах, Італії, а в Євросоюзі 2008 року ухвалено Директиву про застосування медіації в цивільних і комерційних справах» [6, с. 108, 111].

І. Лях також наводить позитиви в зарубіжній практиці застосування медіації. Це, зокрема, співпраця сторін суперечки за участі посередника-медіатора; виявлення у такій співпраці нових конструктивних рішень. Існують навіть спеціальні служби медіації, визначені державою посередники, арбітри, консультанти, що мають на прохання сторін конфлікту допомогти його вирішити [7, с. 141].

За результатами аналізу А. Біцай, існують дві концепції правового статусу медіації: згідно з першою вона має бути складовою судового процесу, згідно з другою – автономним засобом вирішення правової суперечки. В ідеальному варіанті медіація має передувати судовому процесу (але переважно існує паралельно з ним) [8, с. 88]. Відповідно медіація й класифікується: за ступенем її запровадження в судову систему – присудова модель (з участю приватних медіаторів, спеціалізованих організацій, працівників суду, безпосередньо судді, який розглядає справу) та позасудова (за участі третьої сторони – зовнішнього медіатора – за загальними рекомендаціями, затвердженими Радою Європи щодо медіації) [8, с. 86–87]. У першому разі медіація може бути частиною кримінального процесу, альтернативою йому або додатком до традиційної системи судочинства. Залежно ж від ролі медіатора в цій процедурі вирізняються інші моделі – оціночна та сприяльна, що передбачають взаємодію сторін і медіатора та активне втручання першого у медіаційний процес [8, с. 87].

М. Лазаренко, узагальнивши моделі медіації в різних країнах, також відзначає присудову (пов'язану із судом та інтегровану в судову систему, коли суддя або сам її проводить, або ініціює) та позасудову (проведену зовнішнім медіатором, що активізує власні повноваження сторін у перемовинах і виявляє високу ефективність вирішення конфлікту) [6, с. 112]. А. Біцай визначає конкретні функції моделей медіації, серед яких – пізнавальна, що передбачає розширення знань про цю процедуру; інформаційна, що полягає в наявності інформації про техніку медіації; аналітична, що дозволяє побачити результати застосування процедури в певній галузі права; евристична, що виявляє закономірності використання моделей медіації. За словами вченої, моделі характеризують медіатора: наскільки він ефективно веде перемовини, як його поведінка впливає на хід медіації, а його консультації – на врегулювання конфлікту, як розподіляється обсяг повноважень між ним і суб'єктами процесу, якими є розвинутими його фахові навички [8, с. 86].

Що ж до засад здійснення медіації, що декларуються в наукових працях, законодавстві зарубіжних країн і в міжнародних актах, то М. Лазаренко відзначає принципи добровільності (усвідомлена й самостійна згода суб'єктів медіаційного процесу на розв'язання їхньої суперечки таким чином, а також можливість відмовитися від участі в цьому процесі), рівності (суб'єкти мають рівні права під час медіаційного процесу, незважаючи на будь-які їх ознаки та стан), нейтральності медіатора (він мусить неупереджено й сумлінно виконувати свої обов'язки, підводячи сторони до самостійної угоди), конфіденційності (інформація, отримана від учасників процесу, не може розголошена медіатором без їх згоди), недоторканності медіатора (він не може піддаватися тиску, зокрема щодо відкриття інформації чи її джерел) [6, с. 111].

Закон України «Про медіацію» встановлює принципи добровільної участі її суб'єктів, активності й самовизначення сторін, незалежності й нейтральності посередника-медіатора, конфіденційності інформації щодо сторін [1]. І. Лях конкретизує ці засади відповідно до трудової суперечки, це зокрема принципи повноти й усебічності дослідження обставин справи, рівності сторін конфлікту, швидкості його вирішення, об'єктивності, змагальності та гласності [7, с. 138].

Узагальнена структура процесу медіації визначає такі його етапи: 1) укладання угоди про медіацію між суб'єктами та обраним ними медіатором; 2) визначення сторін конфлікту й основних його аспектів; 3) визначення інтересів кожної зі сторін; 4) пошук загальноприйнятого рішення; 5) укладання угоди за результатами медіації; 6) оформлення медіатором досягнутих результатів у письмовій формі [7, с. 139]. За Законом «Про медіацію», порядок процедури медіації є такий: медіатор збирає відповідні інформацію, документи, узгоджує із суб'єктами порядок медіаційного процесу, медіація відбувається за вимогами Закону, за встановленими в угоді правилами, за нормами правової етики, припиняється після укладення угоди за результатами медіації чи в разі відмови, визнання недієздатним або смерті когось з учасників процесу [1].

Така угода характеризується А. Біцай як суто формальна за юридичною природою, адже примусової сили така угода не має, хоча правовідносини сторін у ній закріплено [8, с. 87]. У свій час угода про проведення медіації, за Законом України «Про медіацію», містить інформацію про медіатора, суб'єктів медіації та про суб'єкта, який забезпечує цей процес, строки й місце його проведення, визначену мову проведення, предмет суперечки, права та обов'язки суб'єктів медіаційної процедури, умови оплати послуг медіатора й витрат на підготовку та проведення медіації, умови конфіденційності інформації та відповідальності всіх учасників процесу за порушення встановлених умов медіації, порядок і підстави припинення процесу [1].

Ще один елемент традиційного процесу медіації потребує короткого аналізу – сам медіатор, правовий статус якого виявляється в наявності сертифікату на таку діяльність. За словами М. Лазаренка, у деяких країнах існують підготовлені судами чи міністерствами списки приватних медіаторів, серед яких сторони конфлікту обирають

собі посередників, в інших – спеціальні інституції посередництва, діяльність яких декларовано на законодавчому рівні, зокрема й Радою Європи. Медіатор має супроводжувати суб'єктів медіації на шляху до вирішення суперечки – збирати потрібну інформацію, узагальнювати її, створювати атмосферу для ухвалення сторонами потрібного їм рішення, не впливаючи своїми поглядами на це. У такому разі (за позасудової моделі медіації) сторони зберігають власну автономність – самостійно вирішують свій конфлікт у процесі співпраці, перемовин, що зумовлює високий рівень справедливості їх результатів. Після цього ухвалення рішення за результатами медіаційної процедури сторони укладають угоду, що юридичної примусової сили не має (за присудової моделі вона набуває цивільно-правового характеру, адже затверджена суддею-медіатором) [6, с. 112–113].

Як проміжний висновок щодо медіації як методу вирішення суперечок можна відзначити її демократичний характер, що полягає в самостійності та незалежності всіх учасників цього процесу – сторін конфлікту та їхнього посередника-медіатора. Саме тому цю процедуру потрібно впроваджувати в Україні, де медіація – це новація, що потребує окремих досліджень, і хоча від 16 листопада 2021 року вже діє Закон України «Про медіацію», вона ще залишається недостатньо зрозумілою та досконалою.

У Законі декларуються права та обов'язки суб'єктів цієї процедури (ст.ст. 18–19). Зокрема, правами визначаються обрання медіатора (за взаємною згодою), визначення умов угоди про медіацію, залучення інших учасників до процедури медіації, відмова від послуг обраного медіатора його заміна на іншого, відмова й від самої участі у процедурі медіації, звернення до суду (зокрема третейського, міжнародного) в разі невиконання угоди щодо медіації, залучення відповідних спеціалістів – зокрема експерта, перекладача, обраних за домовленістю сторін. Обов'язками суб'єктів медіаційної процедури є такі: дотримання вимог цього Закону, правил медіації та угоди про її проведення; виконання визначених угодою результатів медіації та обов'язків, визначених Законом [1].

Н. Дараганова визначає позитивні чинники впровадження в Україні інституції медіації. Це зокрема такі: медіатор – нейтральна третя сторона, що забезпечує успішні перемовини між двома іншими сторонами задля вирішення суперечки між ними; його сторони обирають самостійно й можуть змінити за потреби; сторони суперечки добровільно вибирають медіацію як метод вирішення конфлікту, беруть участь у медіаційній процедурі та досягають позитивних і загальноприйнятних результатів; конфлікт за допомогою медіації вирішується в умовах приватності задля дотримання конфіденційності наданої інформації; позасудовий розгляд конфлікту є більш простим, зручним, із меншими витратами часу й коштів на відміну від судового; процедура медіації може відбуватися як під час судового провадження, так і до судового розгляду, й може бути припинена за ініціативи однієї зі сторін процесу; після ухвалення сторонами загальноприйнятого рішення вони його виконують без втручання виконавчої служби [5].

І. Лях підтверджує ці позитивні чинники на прикладі зарубіжного досвіду, де медіація зберігає позитивні стосунки між сторонами конфлікту й убезпечує їх від додаткових матеріальних витрат; у випадку трудової суперечки знижує рівень звільнення працівників і покращує трудову атмосферу в їх колективі; може не тільки вирішувати суперечку, а й бути засобом примирення її сторін. Проте вчена відзначає й перешкоди для медіації в умовах України: недосконалість законодавчої бази з питань медіації, неознайомленість громадськості про цей засіб вирішення конфліктів (зокрема трудових, сімейних тощо). Також існують думки, що медіація має меншу ефективність порівняно з традиційними судовими засобами [7, с. 140–141]. Проте в Україні, попри зрозумілу недосконалість законодавчої бази, явище медіації заслуговує на актуалізацію в нових умовах нашої держави після війни, коли всі галузі життєдіяльності отримують новий поштовх до розвитку.

Повертаючись до конфліктів в управлінських структурах, зазначимо, що взагалі в цій сфері головною функцією є ухвалення управлінських рішень, адже від цього залежить уся організаційна діяльність. До кола виконавців цієї функції належить не лише керівник, але й конкретні виконавці – підлегли йому працівники. Ухвалення таких рішень може відбуватися у складних умовах, до яких, окрім дефіциту часу та інформації, належать і конфліктна ситуація. Тому вирішення конфлікту й ухвалення відповідного рішення стає головним критерієм оцінювання як керівника, так і всієї організації, а якщо це установа публічного управління – то й усієї державної чи самоврядної влади [3, с. 162].

Л. Мотозюк конфлікт в умовах процесу ухвалення рішень ототожнює з можливими ризиками. Такий ризик навіть конкретно очікується на певній стадії управлінської діяльності – після постановлення мети, визначення критеріїв рішення, зокрема найважливіших, вироблення альтернативних рішень та їх порівняння – як можлива помилка у виборі варіанта, яку потрібно оцінити перед тим, як ухвалити остаточно управлінське рішення [3, с. 163].

Ураховуючи уніфікацію, яку зробили О. Гура та Т. Гура, та проектуючи її на організацію та управління, можна відзначити типи поведінки управління в ситуації конфлікту: конкуренція (пріоритет – досягнення своїх кар'єрних цілей із намаганням обійти в цьому суперника), ухилення (уникнення вирішення проблеми, перекладання її на інших), пристосування (формальна згода з опонентами, нібито підтримка їх позиції), співробітництво (спільна участь працівників установи у вирішенні загальної проблеми, зокрема й сторін внутрішнього конфлікту), компроміс (досягнення консенсусу відбувається через поступлення кожною стороною конфлікту своїми інтересами) [2, с. 110].

Л. Мотозюк характеризує конфліктну ситуацію при ухваленні рішення дихотомічно – як деструктивну, так і конструктивну. Також у такій конфліктній ситуації виявляється індивідуальність керівника, адже його внутрішні орієнтації безпосередньо впливають на весь управлінський процес саме через адекватний вибір рішення, а ще й потрібно враховувати напрямки розгортання реалізації того рішення, тобто дійовий компонент управлінської діяльності. Тому відбувається мотивування дій керівника (як результат переживання ним можливих наслідків його рішення) на врахування всіх варіантів подальших подій (діяльності). Управлінець ще й прагне при цьому зберегти свій статус, не поступившись власними принципами й зумівши при цьому розв'язати конфлікт, а ще краще – розвинути як особистість (новий досвід, нові якості, нові вміння й навички) [3, с. 164].

Отже, ефективність управлінської діяльності, зокрема ухвалення рішень, повною мірою залежить від особистості керівника – його особистих якостей, готовності діяти в умовах конфлікту, враховувати здібності підлеглих, які складають управлінську команду. Проте є ще один метод, що використовується в передових колективах і країнах, – це групове ухвалення рішень, що передбачає вироблення колективного погляду на вирішення проблеми у процесі спільної діяльності. Це, звісно, сприяє розвитку самоуправління, створює комфортну трудову атмосферу, адже виконується таке рішення охоче й з ентузіазмом [3, с. 165].

Виходячи з цього, й сутність медіаційного процесу в управлінській установі передбачає саме колективне ухвалення рішення про вибір правильного його варіанту, чим забезпечить, по-перше, згуртування колективу управлінців, а по-друге – загальноприйнятне розв'язання проблемної ситуації / конфлікту. Цю думку можна підтвердити твердженням Л. Мотозюк про доцільність використання в управлінській діяльності психологічного забезпечення: це сприяє виробленню більшої кількості альтернативних варіантів рішення, пришвидшує ухвалення рішення й відповідне реагування на зміни в конфліктній ситуації, розширює коло суб'єктів ухвалення рішень – для продуктивного їх взаємовпливу, підвищує загальний рівень управлінської діяльності. У такому розумінні управлінське рішення передбачає вибір керівником (колективом) з-поміж альтернативних варіантів такого, що найшвидше й найефективніше досягне мети. Це може бути стандартний варіант рішення, бінарний чи поліваріантний, інноваційний варіант. Такий вибір репрезентує ухвалення рішень у вузькому сенсі, а в широкому термін «ухвалення рішень» позначає сам процес управління загалом – разом із підготовкою та виконанням цього рішення й контролем за подальшими результатами [3, с. 163].

### Висновки

Розглянувши проблеми впровадження медіації у сферу публічного управління в ситуаціях вирішення конфліктів, можна зробити відповідні висновки.

1. У науковому дискурсі конфлікт позначає протистояння двох чи більше суб'єктів у доведенні своїх інтересів або поглядів. Конфлікт характеризується такими негативними аспектами, як дискомфорт у колективі, непорозуміння, ворожість. Як головна причина визначаються невідповідність позицій суб'єктів, їх індивідуальні особливості, а результатом може стати деструктивна ситуація в колективі, що загрожує всій організації. Проте, з іншого боку, вирішення конфлікту може призвести до зворотнього результату (позитивного) – згуртування колективу в напрямку вирішення загальної проблеми. Тобто, з одного боку, конфлікт – це деструкція (психологічне роз'єднання колективу, загострена конкуренція в ньому, індивідуалізм), з іншого – це конструктивний позитив (згуртування колективу, спільна діяльність, розвиток самосвідомості, розуміння інших). Такі конструктивні риси мають обов'язково регулюватися як керівником організації, так і всіма працівниками.

2. Медіація відома в сучасному світі як метод розв'язання конфліктів без участі судової системи. Вона полягає в такому: вільні перемовини між сторонами суперечки за участі нейтрального посередника (медіатора), який забезпечує досягнення взаємоприйнятних результатів і фіксує їх в угоді. Медіація характеризується такими позитивними рисами: добровільна згода суб'єктів конфлікту на медіацію, нейтральність посередника, співпраця сторін, самостійне спільне ухвалення загальноприйнятного рішення. Відповідно засадами медіації визначаються принципи добровільності, рівності сторін, нейтральності й недоторканності медіатора, конфіденційності інформації. Етапами медіаційної процедури є такі: укладання угоди про медіацію, визначення сторін конфлікту та їх інтересів, пошук загальноприйнятного рішення, укладання угоди за результатами медіації та її оформлення. При цьому така угода примусової сили не має. Медіатор мусить мати сертифікат на таку діяльність.

3. Відповідно до позитивного зарубіжного досвіду в Україні потрібно впроваджувати медіацію, адже вона є демократичною за своєю сутністю: сторони добровільно обирають медіацію як метод вирішення конфлікту, обирають медіатора, у процесі рівноправного обговорення досягають загальноприйнятних результатів, їм забезпечено приватність і конфіденційність, такий процес є простим і зручним, може бути припинений за ініціативи сторони. Також медіація вирішує не лише трудові чи сімейні суперечки, але й внутрішні організаційні конфлікти, де медіатором може виступити керівник. Так, в публічному управлінні за допомогою колективного обговорення вирішуються загальні проблеми, ухвалюються відповідні рішення, що можуть впливати не лише на діяльність окремої адміністративної установи, але й на імідж держави загалом. Тобто партнерство в ухваленні управлінських рішень є провідною засадою сучасного демократичного суспільства, а тому потребує впровадження в Україні.

## Список використаної літератури

1. Закон України «Про медіацію» від 16.11.2021, № 1875-IX. *Верховна Рада України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1875-20#Text>
2. Гура О.І., Гура Т.Є. Психологія управління соціальною організацією : навчальний посібник. Запоріжжя : КПУ, 2013. 168 с.
3. Мотозюк Л.М. Психологічні аспекти ухвалення управлінських рішень у конфліктних ситуаціях. *Збірник наукових праць Хмельницького інституту соціальних технологій Університету «Україна»*. 2013. № 2(8). С. 162-166.
4. Боковець В.В., Соколовська В.В. Управління конфліктними ситуаціями в роботі з персоналом. *Ефективна економіка*. DOI: 10.32702/2307-2105-2020.10.4
5. Дараганова Н. В. Медіація як один із альтернативних способів вирішення індивідуальних трудових спорів. *Юридична наука*. 2011. № 6. С. 77-83. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/jnn\\_2011\\_6\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/jnn_2011_6_10)
6. Лазаренко М. М. Імплементация медіації в правову систему: міжнародний досвід та перспективи інституціоналізації в Україні. *Актуальні проблеми міжнародних відносин*. 2015. Вип. 124, Ч. II. С. 108-116.
7. Лях І. О. Актуальні питання провадження медіації при вирішенні трудових конфліктів. *Розвиток підприємництва в Україні: безпека здійснення господарської діяльності* : зб. наук. пр. за підсумками круглого столу, 14 груд. 2018. Харків : Право, 2018. С. 137-142.
8. Біцай А.В. Моделі медіації у світі та перспективи для України. *Право і суспільство*. 2013. № 6. С. 85-89.
9. Мазаракі Н.А. Медіація в Україні: теорія та практика : монографія. Київ : Київський національний торговельно-економічний університет, 2018. 276 с. DOI: <http://doi.org/10.31617/m.knute.2018-1155>

## References

1. Zakon Ukrayiny «Pro mediatsiyu» vid 16.11.2021 [Law of Ukraine «On Mediation» 16.11.2021], # 1875-IX. Verkhovna Rada Ukrayiny. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1875-20#Text>
2. Hura O.I., Hura T.Ye. (2013) *Psychology of social organization management: a study guide*. Zaporizhzhya : KPU, 168 s.
3. Motozyuk L.M. (2013) *Psychological aspects of management decision-making in conflict situations*. Zbirnyk naukovykh prats' Khmel'nyts'koho instytutu sotsial'nykh tekhnolohiy Universytetu «Ukrayina» [Collection of scientific works of the Khmelnytskyi Institute of Social Technologies of the University «Ukraine»]. # 2(8). S. 162-166.
4. Bokovets' V.V., Sokolovs'ka V.V. *Upravlinnya konfliktnykh sytuatsiyamy v roboti z personalom* [Management of conflict situations in work with personnel]. *Efektivna ekonomika* [Efficient economy]. DOI: 10.32702/2307-2105-2020.10.4
5. Darahanova N. V. (2011) *Mediatsiya yak odyn iz al'ternatyvnykh sposobiv vyrishennya indyvidual'nykh trudovykh sporiv* [Mediation as one of the alternative methods of solving individual labor disputes]. *Yurydychna nauka* [Legal science]. # 6. S. 77-83. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/jnn\\_2011\\_6\\_10](http://nbuv.gov.ua/UJRN/jnn_2011_6_10)
6. Lazarenko M. M. (2015) *Implementatsiya mediatsiyi v pravovu systemu: mizhnarodnyy dosvid ta perspektyvy instytutsionalizatsiyi v Ukrayini* [Implementation of mediation in the legal system: international experience and prospects of institutionalization in Ukraine]. *Aktual'ni problemy mizhnarodnykh vidnosyn* [Actual problems of international relations]. Vol. 124, # 2. S. 108-116.
7. Lyakh I. O. (2018) *Aktual'ni pytannya provadzhennya mediatsiyi pry vyrishenni trudovykh konfliktiv* [Actual issues of mediation proceedings in the resolution of labor conflicts]. *Rozvytok pidpryyemnytstva v Ukrayini: bezpeka zdiysnennya hospodars'koyi diyal'nosti* : zb. nauk. pr. za pidsumkamy kruhloho stolu, 14 hrud. 2018 [Development of entrepreneurship in Ukraine: safety of economic activity: coll. of science according to the results of the round table, December 14. 2018]. Kharkiv : Pravo, S. 137-142.
8. Bitsay A.V. (2013) *Modeli mediatsiyi u sviti ta perspektyvy dlya Ukrayiny* [Models of mediation in the world and prospects for Ukraine]. *Pravo i suspil'stvo* [Law and society]. # 6. S. 85-89.
9. Mazaraki N. A. (2018) *Mediatsiya v Ukrayini: teoriya ta praktyka* [Mediation in Ukraine: theory and practice]: monohrafiya. Kyiv : Kyivs'kyi natsional'nyi torhivel'no-ekonomichnyi universytet, 276 s. DOI: <http://doi.org/10.31617/m.knute.2018-1155>

В. В. КРЕЙДЕНКО

кандидат наук з державного управління,  
доцент кафедри парламентаризмуНавчально-науковий інститут публічного управління та державної служби  
Київського національного університету імені Тараса Шевченка

ORCID: 0000-0003-2300-7857

## ПАРЛАМЕНТ І ПАРЛАМЕНТАРИЗМ В УКРАЇНИ: ДЕРЖАВНО-УПРАВЛІНСЬКІ ТА ПОЛІТИКО-ПРАВОВІ АСПЕКТИ

У статті досліджено інститут парламенту та феномен парламентаризму в Україні крізь призму державного управління та політико-правових аспектів. Особлива увага приділяється ролі Верховної Ради України в системі державної влади, її функціональній та нормативно-правовій базі, а також взаємодії з іншими гілками влади та політичними інститутами, а також ролі парламенту в забезпеченні демократичних процесів в Україні.

У тексті детально аналізується правовий статус Верховної Ради України, її повноваження та функції, а також механізми контролю за діяльністю виконавчої влади. Особливу увагу зосереджено на реалізації законодавчих повноважень парламенту та ефективності контролю за дотриманням конституційних принципів. Вивчаються сучасні виклики, з якими стикається український парламент, включаючи корупцію, відсутність прозорості в ухваленні рішень та питання політичної відповідальності.

В статті особлива увага приділяється сучасному стану парламентської демократії та стабільності політичної системи. У цьому контексті аналізуються причини недостатньої відповідальності депутатів перед виборцями, нестабільність коаліцій та недовіра громадян до парламентських процесів. Також піднімаються питання боротьби з корупцією та необхідність реформування політичної системи для зміцнення демократії.

Отримані висновки підкреслюють складність і суперечливість політико-правових та державно-управлінських аспектів українського парламентаризму, наголошуючи на необхідності подальших реформ для зміцнення демократичних принципів, підвищення прозорості і політичної відповідальності. Особливої уваги заслуговує питання покращення прозорості парламентських процесів і активнішої взаємодії з громадянським суспільством.

Варто відзначити, що дане дослідження сприяє глибшому розумінню державно-управлінського та політико-правового контексту українського парламентаризму, а також формулює рекомендації для майбутніх досліджень і практичних заходів, спрямованих на удосконалення функціонування парламенту та зміцнення демократичних інститутів в Україні.

**Ключові слова:** парламент, парламентаризм, Верховна Рада України, державно-управлінські аспекти, політико-правові аспекти, демократія, законодавча функція.

V. V. KREIDENKO

Candidate of Sciences in Public Administration,

Associate Professor at the Department of Parliamentarism

Educational and Scientific Institute of Public Administration and Civil Service

of Taras Shevchenko National University of Kyiv

ORCID: 0000-0003-2300-7857

## PARLIAMENT AND PARLIAMENTARISM IN UKRAINE: PUBLIC ADMINISTRATIVE AND POLITICAL AND LEGAL ASPECTS

The article examines the institution of parliament and the phenomenon of parliamentarism in Ukraine through the prism of public administration and political and legal aspects. Special attention is paid to the role of the Verkhovna Rada of Ukraine in the system of state power, its functional and legal basis, as well as interaction with other branches of government and political institutions, as well as the role of the parliament in ensuring democratic processes in Ukraine.

The text analyzes in detail the legal status of the Verkhovna Rada of Ukraine, its powers and functions, as well as the mechanisms of control over the activities of the executive power. Particular attention is focused on the implementation of the legislative powers of the parliament and the effectiveness of monitoring the observance of constitutional principles. Contemporary challenges facing the Ukrainian parliament are studied, including corruption, lack of transparency in decision-making, and issues of political accountability.

The article pays special attention to the current state of parliamentary democracy and the stability of the political system. In this context, the reasons for insufficient accountability of deputies to voters, instability of coalitions, and distrust of citizens in parliamentary processes are analyzed. Issues of fighting corruption and the need to reform the political system to strengthen democracy are also raised.

*The obtained conclusions emphasize the complexity and contradictions of political-legal and state-management aspects of Ukrainian parliamentarism, emphasizing the need for further reforms to strengthen democratic principles, increase transparency and political responsibility. The issue of improving the transparency of parliamentary processes and more active interaction with civil society deserves special attention.*

*It is worth noting that this study contributes to a deeper understanding of the state-administrative and political-legal context of Ukrainian parliamentarism, as well as formulates recommendations for future research and practical measures aimed at improving the functioning of the parliament and strengthening democratic institutions in Ukraine.*

**Key words:** parliament, parliamentarism, Verkhovna Rada of Ukraine, state management aspects, political and legal aspects, democracy, legislative function.

### Постановка проблеми

Аналіз діяльності парламенту і парламентаризму в Україні у контексті державного управління та політико-правових аспектів є надзвичайно актуальним, оскільки ці інститути відіграють ключову роль у забезпеченні функціонування політичної системи країни. Незважаючи на те, що Верховна Рада України має важливі повноваження відповідно до Конституції, існує ряд проблем, які потребують термінового вирішення. Нестабільність політичної ситуації, корупція, недостатня прозорість у прийнятті рішень та питання відповідальності депутатів перед виборцями ставлять під сумнів ефективність парламентської діяльності.

У сучасних умовах важливо визначити, як ці проблеми впливають на стабільність і функціонування парламенту, а також на процеси, що регулюють взаємодію з іншими політичними інститутами. Необхідно також дослідити, як парламент взаємодіє з громадськістю і які є перешкоди для ефективного представництва громадянських інтересів.

Таким чином, постановка проблеми полягає у вивченні складних державного управлінського та політико-правового аспектів, зокрема, у визначенні викликів, що стоять перед українським парламентом і парламентаризмом, і в розробці рекомендацій для поліпшення його функціонування, забезпечення прозорості та підвищення ефективності парламентської діяльності.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Науковці з різних наукових сфер, таких як державне управління, теорія та історія права, політологія, конституційне та адміністративне право, провели низку досліджень, спрямованих на вивчення об'єктивних і суб'єктивних закономірностей виникнення, розвитку та функціонування українського парламентаризму у всій його структурній складності. Багато робіт українських дослідників зосереджуються на функціях і ролі парламенту, проте не охоплюють усі аспекти українського парламентаризму в державно-управлінському, політичному, історичному та сучасному контексті. Серед вчених, які досліджували ці питання, були О. Бандурка, Ч. Вайз, А. Георгіца, В. Гошовська, Ю. Древаль, В. Журавський, Н. Заяць, П. Кислий, І. Коліушко, О. Копиленко, В. Шаповал, Ю. Шемшученко та ін.

Таким чином, результати аналізу вказують на потребу в глибокому і всебічному дослідженні проблем українського парламентаризму, враховуючи його державно-управлінські та політико-правові аспекти. Це включає системний розгляд структурних особливостей парламенту, а також аналіз його ролі та функцій у політичній, державно-управлінській і правовій системі, разом з оцінкою ефективності парламентського контролю і його впливу на процес прийняття рішень.

### Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є виокремлення та аналіз проблем державно-управлінського та політико-правового характеру парламенту та парламентаризму в Україні в сучасних умовах.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Парламент і парламентаризм є критично важливими складовими політичної системи України, які відіграють ключову роль у законодавчому процесі та державному управлінні. Парламентаризм як політичний інститут виступає домінуючим фактором формування сучасного політичного процесу та його внутрішніх детермінант [1, с. 9].

Парламент як суспільне явище і форма парламентського правління є вагомим надбанням цивілізації. Непересічне значення парламентаризму полягає в тому, що він безпосередньо пов'язаний із запровадженням представницької влади та з ідеєю верховенства парламенту в системі влади, яка зумовлюється принципами представницької демократії, народного суверенітету, паритету прав людини і держави [2, с. 3].

Верховна Рада України, як найвищий законодавчий орган країни, має безпосередню відповідальність за прийняття законів, здійснення контролю за діяльністю уряду та представляє інтереси громадян. Конституція України визначає її широкі повноваження, що підкреслює її значущість у процесі державного управління. Роль Верховної Ради не лише в формуванні правового середовища, але й у забезпеченні ефективного функціонування державних інститутів є основою для стабільного розвитку демократичного суспільства. З для виконання цих функцій в Конституції України чітко визначений конституційний склад Верховної Ради України, який складається з 450 народних депутатів, що обираються на підставі загального, рівного та прямого виборчого права через таємне голосування терміном на п'ять років [3].



Парламент України виконує важливі функції представництва, законодавчої діяльності та контролю за діяльністю уряду, перетворюючи його на основну платформу для політичного діалогу, формування коаліцій і ухвалення рішень, в свою чергу, народні депутати України представляють населення відповідної території, є виразниками волі, що відповідає потребам виборців [4, с. 137]. Однак на практиці Верховна Рада стикається з низкою серйозних викликів, які ускладнюють її роботу, а саме:

– політична нестабільність в Україні часто є наслідком розбалансованості політичних сил і частих змін у політичному середовищі. Це створює труднощі у формуванні стабільних коаліцій і ефективних урядів, що, в свою чергу, впливає на здатність парламенту ухвалювати стратегічні рішення та впроваджувати довгострокові реформи;

– дуалізм виконавчої гілки влади може призводити до неузгодженості в законодавчому процесі. Наприклад, якщо Президент і уряд мають різні погляди на певні законодавчі ініціативи, це може затримати ухвалення важливих законів або призвести до їх зміни в процесі розгляду Верховною Радою. Такі суперечки можуть уповільнити реалізацію реформ і створити правову невизначеність;

– фрагментація політичного спектру, яка часто є результатом виборчих систем і роздробленості політичних партій, ускладнює досягнення консенсусу і реалізацію політичних програм. Наявність великої кількості малих партій та зміна політичних альянсів значно ускладнює процес прийняття рішень, оскільки досягнення згоди між різними політичними групами стає складнішим.

Ці проблеми не тільки уповільнюють ефективність роботи парламенту, але й заважають досягненню стратегічних цілей держави, оскільки стабільність і результативність урядових структур є ключовими для успішного проведення політичних та економічних реформ, особливо в контексті прагнення до повноцінного членства в Європейському Союзі.

Ще однією значною проблемою є корупція, яка серйозно підриває довіру до парламенту і політичних інститутів загалом. Корупційні практики створюють численні перепони для розвитку демократичних процесів, знижують якість законотворчої діяльності та негативно впливають на ефективність парламентського контролю. Зокрема, корупція може призводити до прийняття законів, які вигідні окремим інтересам, а не громадськості в цілому, що підриває принципи справедливості та рівності перед законом.

Корупція також погіршує імідж держави на міжнародній арені, що може ускладнювати співпрацю з міжнародними партнерами і відштовхувати інвесторів. Для подолання цих проблем необхідно забезпечити максимальну прозорість в парламентській діяльності, впроваджуючи системи моніторингу та звітності, а також створити ефективні механізми контролю за доброчесністю депутатів. Важливо також впроваджувати комплексні антикорупційні стратегії, які включають підвищення відповідальності за корупційні дії, а також освітні програми, що формують антикорупційну культуру серед публічних службовців і суспільства.

Проблема недостатньої прозорості та підзвітності парламентської діяльності залишається надзвичайно актуальною. Відсутність чітких і доступних механізмів контролю за діяльністю депутатів та процесом ухвалення законів може суттєво підривати легітимність парламенту і зменшувати довіру громадян до його функціонування. Це може призводити до зниження рівня суспільного контролю і участі в політичних процесах, що є критично важливим для здорової демократії.

Крім того, відсутність прозорості може створювати сприятливе середовище для корупційних практик, оскільки громадськість і контрольні органи не мають достатньої інформації для перевірки правомірності рішень і дій депутатів. Для підвищення довіри громадськості і забезпечення справедливого процесу ухвалення рішень важливо впровадити нові стандарти відкритості та інформаційної доступності.

Окремо варто відзначити проблему економічної нестабільності в Україні, що суттєво впливає на роботу Верховної Ради, створюючи численні труднощі для ефективного законодавчого процесу. Зокрема, економічні проблеми призводять до зменшення ресурсів для реалізації державних програм і ініціатив, що ускладнює впровадження соціальних та економічних реформ. Крім, цього зовнішні чинники та повномасштабне вторгнення негативно впливають на роботу Верховної Ради України, ускладнюючи її функціонування і законодавчий процес, змушують парламент зосереджуватися на питаннях національної безпеки та оборони, що може відволікати від інших важливих законодавчих ініціатив в сфері економіки, соціального захисту населення чи інтеграції України до Європейського Союзу.

Таким чином, глибоке розуміння та аналіз державно-управлінських та політико-правових аспектів українського парламенту і парламентаризму допомагає виявити існуючі проблеми і знайти шляхи їх вирішення. Це є ключовим для формування стабільної, демократичної та ефективної політичної системи в Україні. Політична нестабільність може мати різні причини, які взаємодіють і посилюють одна одну.

Розглянемо таблицю 1, що відображає різні причини політичної нестабільності.

Таблиця 1

Причина політичної нестабільності	Опис	Наслідки
Політичні конфлікти та роздробленість політичного спектру	Часті зміни у політичних силах і конфлікти між ними. Нестабільність політичного ландшафту.	Ускладнення формування коаліційного уряду і прийняття рішень.
Економічна нестабільність	Кризові економічні умови, висока безробіття, економічні нерівності, недостатність соціальних заходів.	Підрив довіри громадян до політичних лідерів і соціальні протести.
Недостатня прозорість політичних процесів	Низька прозорість у парламентській діяльності та недостатня ефективність механізму контролю.	Дискредитація роботи парламенту і підрив довіри громадян.
Вплив зовнішніх чинників	Геополітичні інтереси, повномаштабна війна, регіональні конфлікти, залучення до міжнародних альянсів	Загострення політичної ситуації і ускладнення роботи парламенту.

Цей аналіз може слугувати основою для розробки і впровадження державних і політичних реформ, які спрямовані на укріплення демократії, створення правової держави і підвищення довіри до політичних інститутів.

Політичні конфлікти і роздробленість політичного спектру створюють суттєві перешкоди для стабільного функціонування парламенту. Щоб подолати ці проблеми, необхідно запровадити кілька ключових заходів. По-перше, важливо розробити і впровадити нові механізми для формування стабільних коаліцій. Це може бути досягнуто шляхом удосконалення процедур коаліційних переговорів і створення прозорих та чітких критеріїв для укладення коаліційних угод, що дозволить зменшити політичну фрагментацію і забезпечити більшу стабільність у урядовій структурі.

По-друге, необхідно заохочувати політичний діалог і компроміс між різними фракціями та партіями. Створення платформ для конструктивного обговорення і досягнення компромісів допоможе зменшити конфлікти і полегшить процес прийняття рішень, що в свою чергу підвищить ефективність роботи парламенту.

Економічна нестабільність в Україні потребує комплексного підходу для її подолання. Важливим кроком є впровадження економічних реформ, спрямованих на стабілізацію економічного становища. Це включає поліпшення бізнес-середовища шляхом зменшення бюрократії і стимулювання інвестицій, що сприятиме зростанню економіки і підвищенню її стійкості. Соціальна підтримка також є ключовим аспектом у боротьбі з економічною нестабільністю. Розробка і реалізація програм соціальної підтримки допоможе зменшити безробіття і економічні нерівності, що, у свою чергу, знизить соціальні протести і підвищить довіру громадян до уряду. Окрім того, забезпечення макроекономічної стабільності є критичним для підтримки економічного балансу. Це може бути досягнуто через ефективне управління монетарною і фінансовою політикою, що включає контроль над інфляцією і борговими зобов'язаннями. Комбінування цих заходів сприятиме створенню більш стабільного економічного середовища, що позитивно вплине на загальну політичну і соціальну ситуацію в країні.

Недостатня прозорість політичних процесів є серйозною проблемою, яка підриває довіру до парламенту і політичних інституцій загалом. Для її вирішення необхідно вжити кілька важливих заходів. По-перше, слід впровадити нові стандарти прозорості в парламентській діяльності, що включає публікацію повних протоколів засідань та звітів про діяльність. Це допоможе забезпечити доступ до інформації та підвищити відкритість роботи парламенту. По-друге, важливо заохочувати громадську участь у політичному процесі через організацію публічних слухань і консультацій. Це дозволить громадянам активно впливати на прийняття рішень і забезпечити більш широкий громадський контроль над діяльністю парламенту. Застосування цих заходів сприятиме підвищенню прозорості політичних процесів і відновленню довіри до політичних інститутів.

Окремо, слід зусередитись на питанні впливу зовнішніх чинників на внутрішню політику України. Зміцнення національної безпеки є ключовим аспектом, який передбачає розробку стратегій для підвищення обороноздатності країни. Це допоможе зменшити вплив зовнішніх загроз на внутрішню політику та забезпечити стабільність. Міжнародна співпраця також відіграє важливу роль у цьому контексті. Активне залучення до міжнародних альянсів і партнерств дозволяє Україні отримувати необхідну підтримку та ресурси для боротьби з зовнішніми загрозами, що сприяє стабілізації ситуації в країні. Окрім того, дипломати мають вести активні переговори з сусідніми країнами та міжнародними організаціями. Ці зусилля спрямовані на вирішення конфліктів та зменшення негативного впливу геополітичних інтересів на внутрішню політику України. Поєднання цих заходів допоможе зменшити зовнішній тиск і забезпечити більш стійке та ефективне функціонування держави.

Отже, вирішення цих проблем потребує комплексного підходу та системних реформ. Окрім, цього для зміцнити демократії, правової держави та підвищення ефективності законодавчого процесу в Україні, на нашу думку, Верховній Раді України необхідно реалізувати наступні рекомендації згідно таблиці 2:

Ці рекомендації орієнтовані на укріплення демократичних основ, політичної стабільності, відповідальності та ефективного представлення інтересів громадян українським парламентом. Їх впровадження потребуватиме значної політичної підтримки, досягнення консенсусу серед політичних сил та належного втілення через відповідні законодавчі та інституційні механізми.

Таблиця 2

Рекомендація	Опис	Мета
Реформа виборчої системи	Провести реформу виборчої системи для забезпечення більшої пропорційності та представництва.	Краще відображення волі громадян у парламенті.
Підвищення відкритості та прозорості	Забезпечити відкритість роботи парламенту через публічний доступ до інформації про законопроекти, засідання та голосування. Розробити електронну систему моніторингу ухвалених рішень.	Покращення прозорості парламентської діяльності та доступу до інформації для громадськості.
Зміцнення контролю та відповідальності	Встановити ефективні механізми контролю за роботою парламенту та його членів, включаючи етичні стандарти, незалежний орган етики та механізм розслідування корупційних порушень.	Забезпечення відповідальності депутатів перед громадянами та підвищення їхньої взаємодії з виборцями.
Посилення громадського участі	Забезпечити активну участь громадськості у прийнятті рішень через публічні слухання, консультації та залучення громадських організацій до законотворчого процесу.	Дозволити громадянам безпосередньо впливати на важливі рішення.
Зміцнення парламентського контролю	Забезпечити ефективний парламентський контроль за виконанням законів та роботою уряду. Підвищити роль комітетів парламенту. Забезпечити регулярну звітність уряду перед парламентом.	Покращення контролю за діяльністю уряду та підвищення ефективності парламентського контролю.
Професіоналізація парламентської діяльності	Забезпечити підвищення рівня знань, навичок та експертизи депутатів через навчальні програми, тренінги та підтримку науково-дослідницької роботи.	Підвищення професійного рівня депутатів та регламентація їхньої діяльності.

### Висновки

Український парламент і парламентаризм займають ключове місце в системі влади та законодавчому процесі країни. Їх політико-правові аспекти визначають правовий статус та повноваження парламенту, а також встановлюють механізми взаємодії з іншими політичними інститутами.

Наразі український парламент стикається з кількома серйозними викликами у забезпеченні ефективного представництва та реалізації волі громадян. Серед основних проблем – недостатнє представництво інтересів різних соціальних груп, відсутність прозорості у роботі парламенту, корупційні впливи та слабкість законодавчого процесу. Ці фактори підривають демократичні засади та ставлять під сумнів ефективність роботи парламенту.

Для зміцнення демократичних принципів та покращення функціонування парламенту в Україні необхідно провести комплексні реформи. Ці реформи мають бути спрямовані на досягнення таких основних принципів: відкритість і прозорість, ефективне представництво громадян, політична стабільність та відповідальність парламенту перед народом.

Серед рекомендацій для подальших реформ українського парламенту виділяються наступні напрямки: реформа виборчої системи, підвищення рівня відкритості та прозорості, зміцнення контролю та відповідальності, підтримка громадської участі, професіоналізація парламентської діяльності та розвиток громадянського суспільства. Ці заходи мають на меті забезпечення більш демократичного, відповідального та ефективного функціонування парламенту.

Впровадження цих реформ вимагатиме широкої політичної підтримки, співпраці між усіма політичними об'єднаннями, експертів і громадськості. Необхідно забезпечити реалізацію відповідних законодавчих та інституційних механізмів, а також змінити політичну культуру та свідомість.

Зміцнення українського парламенту та парламентаризму є надзвичайно важливим для створення потужної та стабільної демократичної країни, яка ґрунтується на принципах правової держави, активній участі громадян та захисті прав і свобод. Щоб досягти цієї мети, Україні необхідно реалізувати ряд реформ, спрямованих на підвищення ефективності представництва, стабільності та відповідальності парламенту перед своїми громадянами. Цей процес вимагатиме зусиль з боку політичних лідерів, керівників парламентських фракцій, активної громадськості та експертів.

Необхідно провести комплексні перетворення, які включатимуть вдосконалення виборчої системи для забезпечення більшої пропорційності та представництва, підвищення прозорості парламентської діяльності через доступ до інформації, та посилення контролю за діяльністю депутатів. Важливими аспектами також є забезпечення активної участі громадськості у політичному процесі та підвищення професійного рівня депутатів.

Тільки за допомогою спільних зусиль усіх цих учасників можна буде побудувати сильну і демократичну політичну систему в Україні. Це сприятиме формуванню стабільного правового середовища, де права і свободи громадян будуть надійно захищені, а парламент зможе ефективно виконувати свої функції як представницький орган.

**Список використаної літератури**

1. Парламентаризм : підручник / В. А. Гошовська та ін. Київ : НАДУ, 2016. 672 с.
2. Журавський В. С. Становлення і розвиток українського парламентаризму (теоретичні та організаційно-правові проблеми). К.: Парламентське вид-во, 2002. 344 с.
3. Конституція України від 28 червня 1996 року № 254к/96-ВР. Дата оновлення: 01.01.2020. URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 15.09.2024)
4. Заяць Н. В. Народне представництво: сутність, суб'єкти та особливості здійснення в Україні: монографія. Луцьк : ПрАТ «Волинська обласна друкарня», 2012. 300 с.

**References**

1. Hoshovska V. A. et al. (2016). *Parliamentarism : a textbook*. Kyiv: NADU [in Ukrainian].
2. Zhuravskiy V. S. (2002). *The Formation and Development of Ukrainian Parliamentarism (Theoretical and Organizational and Legal Problems)*. Kyiv: Parlamentske vyd-vo [in Ukrainian].
3. Constitution of Ukraine. (1996, June 28) Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80#Text> [in Ukrainian]
4. Zaiats N. V. (2012). *People's Representation: Essence, Subjects and Peculiarities of Implementation in Ukraine: A Monograph*. Lutsk: PrAT «Volynska oblasna drukarnia» [in Ukrainian].

**O. V. POLOVTSEV**

Doctor of Sciences in Public Administration, Professor,  
Professor at the Department of Public Administration and Local Self-Government  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0003-4736-6133

**D. S. NAUMOV**

Master of Business Economics Employment  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0009-0001-4717-0504

**O. YA. ROMANUYK**

Master of Public Administration, Director  
LTD "Izumrud"  
ORCID: 0009-0007-2192-1377

## METHODOLOGY'S OF THE SYSTEMIC APPROACH APPLICATION TO SOLVING TYPICAL TASKS OF PUBLIC ADMINISTRATION

*The article is devoted to the study of the possibility of using a systemic approach in the processes of optimal resolution of typical problems of public administration entities. The results showed the possibility of using the specified methodology for the formation of a standard protocol for the optimal solution of typical problems of public authorities.*

*In the work, based on the method of hierarchies, the typical problems of the activity of public authorities are singled out. A detailed correlational and functional analysis of the environment of the problems of public administration subjects and their causes was carried out. The existing applied scientific approaches to solving the problems of power activity were studied and the system approach was singled out as the main methodological tool for the complex solution of problems of this type. It has been proven that for an adequate understanding and modeling of the laws of development of complex systems and their management, it is necessary to use interdisciplinary research, which is based on a systemic approach and uses all modern scientific methods characteristic of both the humanities and exact sciences. Based on the existing methods of solving management problems, theoretical approaches to the formation of the sequence and content of solving typical problems of public authorities have been synthesized. A new vision of optimal approaches to solving problems of the specified class was formed based on an adaptive functional model of management activity.*

*Based on a systemic approach, a meaningful algorithm for the modernization of the organizational and functional structure of public administration entities is proposed.*

**Key words:** public management and administration, systematic approach, technologies of power activity, adaptability of management systems, management tasks, subjects of public management.

**О. В. ПОЛОВЦЕВ**

доктор наук з державного управління, професор,  
професор кафедри державного управління і місцевого самоврядування  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0003-4736-6133

**Д. С. НАУМОВ**

магістр економіки підприємства  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0009-0001-4717-0504

**О. Я. РОМАНЮК**

магістр публічного управління та адміністрування, директор  
ТОВ «ВКФ Ізумруд»  
ORCID: 0009-0007-2192-1377

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДОЛОГІЇ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ТИПОВИХ ЗАДАЧ ПУБЛІЧНОГО УПРАВЛІННЯ

*Стаття присвячена дослідженню можливості використання системного підходу в процесах оптимального розв'язання типових проблем діяльності суб'єктів публічного управління. Результати показали можливість використання зазначеної методології до формування стандартного протоколу оптимального розв'язання типових проблем публічної влади.*

*В роботі, на основі методу ієрархії, виокремлено типову проблематику діяльності органів публічної влади. Проведено детальний кореляційно-функціональний аналіз середовища проблем діяльності суб'єктів публічного управління та причин їх виникнення. Досліджено існуючі прикладні наукові підходи до розв'язання проблем владної діяльності та виокремлено системний підхід як основний методологічний інструмент комплексного вирішення задач цього типу. Доведено, що для адекватного розуміння і моделювання законів розвитку складних систем та управління ними необхідно використовувати міждисциплінарні дослідження, які ґрунтуються на системному підході та використовують всі сучасні наукові методи, властиві як гуманітарним, так і точним наукам. Синтезовано, на основі існуючих методів розв'язання управлінських задач, теоретичні підходи до формування послідовності і змісту розв'язання типових проблем діяльності органів публічної влади. Сформовано нове бачення оптимальних підходів до вирішення задач зазначеного класу на основі адаптивної функціональної моделі управлінської діяльності.*

*Запропоновано, на основі системного підходу, змістовний алгоритм модернізації організаційно-функціональної структури суб'єктів публічного управління.*

**Ключові слова:** публічне управління та адміністрування, системний підхід, технології владної діяльності, адаптивність систем управління, управлінські задачі, суб'єкти публічного управління.

### **Problem statement**

The functioning of public management and administration systems is a rather complex process due to many different factors. In the context of rapid social development, complex socio-economic processes, and political and administrative reforms, the problems of increasing efficiency and effectiveness in public management and administration bodies at all levels have become particularly relevant. It is known that many humanitarian disciplines (philosophy, sociology, history, political science, economics, economic geography, Etc.) have gained a great deal of knowledge about the regularities of the behavior of public management and administration systems. However, this knowledge is so complex and extensive that only some existing scientific fields can analyze it.

A modern, generally accepted methodology used in studying complex systems of varied nature is the systemic approach, and its applied form is systems analysis. Systems analysis is an open discipline and serves as a basis for the development and practical application of new methods and approaches to solving non-trivial problems, the formal description and solution of which is considered too complicated or even impossible using traditional approaches. The systems analysis theory has many practical applications, including unstructured, informal subject areas, public management, and administration. To adequately understand and model the laws of development and management of complex systems, interdisciplinary research is used based on a systemic approach and using all modern scientific methods inherent in the humanities and the sciences [3].

A distinctive feature of the modern world is rapid change. They affect all social system components, including the public administration system. For the public management and administration system, compliance with changes is undoubtedly essential, given that the quality and efficiency of both the public management and administration system and its activities determine the quality and condition of the entire managed social system.

Given the above circumstances, it can be stated that the system of public management and administration, as an open-type social management system, should be able to produce and promote practical social proposals: strategies, programs, and development projects, move social resources and efforts in the directions necessary for society as a managed system. This forces timely and meaningful changes in the techniques and technologies of exercising power and adapting the management system to external changes and internal needs, as contemporary issues are complex and challenging. The question arises about the need for appropriate tools for comprehensive solutions to problems of public authorities in the system of public administration and administration. The methodology of the systemic approach offers the necessary comprehensive tools for solving modern problems of public management and administration problems. The use of a systemic approach to solving the problems of public management and administration entities is a guarantee of complexity and completeness of solving problems arising from the helpful content of public authorities [4].

The complexity of the application of complex instruments based on a systemic approach in the activities of public management and administration entities, their absence in the processes carried out by public authorities, inadequate training and functional capacity of public authorities' employees to use them make it necessary to develop methodological approaches suitable for practical use to solve typical problems of public authorities and make it an essential task for scientific research.

### **Analysis of the latest research and publications**

Leading researchers have actively developed the conceptual foundations of the functioning of public administration mechanisms: V. Averyanov, O. Amosov, G. Astapova, G. Atamanchuk, V. Bakumenko, I. Bulieieva, P. Yegorov, O. Yeryomenko-Grygorenko, V. Knyazev, O. Kovaliuk, V. Kolomyichuk, O. Korotych, M. Kruglov, A. Kulman, M. Lesechko, Y. Lysenko, V. Malynovskyi, O. Mashkov, N. Moiseiev, N. Nyzhnyk, O. Obolenskyi, H. Odintsova, R. Rudnytska, Z. Rumyantsev, Y. Tikhomirov, L. Yuzkov.

However, the general principles of public management and administration mechanisms are developed sufficiently. In that case, the use of the systemic approach as a methodological tool and, on its basis, the solution of organizational and functional problems of public authorities require both research and development of scientific justification for its practical implementation in government activities.

It should be noted that when studying public management and administration systems, scholars face several problems caused by the peculiarities of the public management and administration sector, which can be formulated in the following factors:

- most management decisions are multi-step and serve the interests of the organization and the functioning of stationary system-forming processes rather than the achievement of specific goals and objectives;
- actual management processes take place in conditions of the general inconsistency of goals and interests of system participants, so a significant part of decisions is aimed at regulating and resolving internal system conflicts;
- the expert knowledge used in the process of assessing the state of the system and the effectiveness of particular interventions is subjective; the views of different experts are determined by professional and other interests, which leads to an objective contradiction in the integrated model of expert knowledge;
- the processes taking place in the objects of public management and administration and the environment are characterized by a high number of random events and components and a low level of apparent cause-and-effect relationships, which makes them difficult to formalize and predict;
- the volume of initial data and information sources could be much higher and more reliable, irregular, and non-stationary, complicating statistical methods.

The study of the world and Ukrainian experience of public authorities reveals that a systemic approach is an effective tool for solving many of the above problems in implementing public management and administration tasks. Its use makes it possible to conduct a detailed analysis of the system's components. It offers scientific tools, considering all the features of the elemental components of the research object.

Therefore, the issue of systemic renewal or modernization, in fact, of both public authorities as a whole and their activities, based on a systemic approach, is the subject of current scientific research and development.

#### **Formulation of the research objective**

The study aims to systematically analyze the typical problems of the functioning of public management and administration entities and to develop and substantiate approaches to their practical solution, considering the existing external challenges and internal changes.

#### **Presentation of the primary research material**

According to Professor O. Rohach, the key feature of a subject of public administration is the activity principle – the implementation of public administration. It is based on bodies for which administration is the primary type of activity – executive authorities and local self-government bodies. Despite the wide variety of public administration entities, they all have common features that allow them to be differentiated as such. These features are due to an everyday functional activity – implementing public administration. Therefore, a public administration entity is a public authority that carries out public administration: and provides administrative services or organizational and administrative activities.

The term "public management" was first used by the English civil servant Desmond Keeling in 1972. "Public management is the search for the best use of resources to achieve the priority goals of public policy" [2].

According to the systems theory, public management and administration are unique open social systems with inherent structure and functions. It carries out its activities in direct contact with other systems and depends on changes in internal factors and the external environment. Changes in the external environment impact the system of public management and administration, which necessitates equilibrium reactions adequate to these impacts in the form of changes like its activities and the system's organizational and functional content. If the system cannot respond appropriately to external changes in its operating conditions and internal challenges, it eventually loses its inherent functional content and ability to achieve its goals. The practice of public management and administration confidently shows that at certain times and under certain conditions, there is a need for renewal or fundamental changes both in the system of public management and administration as a whole and in its components – public management and administration entities that carry out practical power activities. These processes must take place in a timely and complete manner to avoid severe errors in the functional activities of government structures. In other words, the quantitative and qualitative results – the sustainability and quality of the social state and the efficiency of public resource use- depending on the modernity and efficiency of the power technologies used in the functional activities of public management and administration entities. The current global systemic challenges facing public management and administration entities can be summarised as follows:

- reconfiguring and upgrading the organizational and functional capabilities of management structures;
- development and use of new technologies of power in practical activities;
- the ability to effectively and efficiently manage social and material resources, to move social capital and the efforts of citizens in the directions necessary for the country, region, and community.

It is an indisputable fact that for public management and administration as a system to maintain its functioning from within, to grow and renew, the management apparatus must be sufficiently diverse and able to change on time [1].

The study of the practical component of the activities of public management and administration entities shows that, depending on changes in the external conditions of functioning, the components of the public authority system may become inconsistent with the new conditions in terms of their functional and organizational content. The techniques and technologies of exercising power either need to be updated or more consistent with the goals and objectives of the public authority. Accordingly, the question arises regarding the availability, possibility, and ability to use methodological and methodological tools for solving problems of improving the power activity in the practical activities of public management and administration.

According to the authors, the systemic approach as a methodology for solving the problems of a balanced response to external challenges and internal changes facing public management and administration entities should provide a holistic answer to the questions of both operational, tactical, and strategic development of both the governing system – a public management and administration entity and its activities, and the managed social system – society as a whole or a separate territorial community. Adjustment of elements and subsystems, updating and modernization of relations, functions, and other components of a public management and administration entity can be presented as a comprehensive project for updating and modernizing government activities. Step-by-step, consistent problem-solving design and achievement of public management and administration goals will allow each component to be worked out in detail and an algorithm of actions to be formed both in the power and management and in the public and political planes. An applied aspect of the practical application of the systemic approach, the creation and implementation of a comprehensive modernization and renewal project, both of the public management and administration entity itself and its functional activities, can be carried out on the platform of a separate territorial community as the object of the project and the public authority that manages it.

In most practical cases, an initiative similar to the proposed comprehensive project stems from public demand for new quality and content of public services, which is confirmed by the results of sociological studies of the quality of government and administration in a particular territory. The authors propose to focus the goal of the comprehensive project on bringing the system of work of the management structures of the public management and administration entity in line with the requirements and standards of public management and administration of the country, the challenges of time, and the needs of the national society and a separate territorial community. The essence of such a comprehensive project should reflect the content of the processes of reconfiguring and modernizing the systems of a particular public management and administration entity. Any project must identify the subjects and objects of the project. The subjects of the proposed project should include public authorities at the national and regional levels that are stakeholders in such changes, a public authority at the elected local level (executive committee of the local council) – a public authority of a particular territorial community, representative authorities of the territorial community, and, if necessary, external experts. The project objects should include the following:

- subsystems of a public management and administration entity of the selected level – structural subdivisions of a public authority (departments, offices, other subdivisions of the executive committee of a local council);
- processes, procedures, techniques, and technologies for exercising power by a public authority and administration entity;
- residents of the territorial community, including various forms of their self-organization.

The following are possible project areas:

- organizational;
- functional;
- socio-political.

Public-management projects have their differences from others. The features of such a project include the following:

- all processes related to the reconfiguration and modernization of the public administration entity and its activities should go hand in hand with its current activities without in any way affecting the quality of existing management services throughout the entire period of the project;
- from the perspective of the "Good Governance" system of public administration accepted in a democratic society, the project should be implemented in an exceptionally constructive and friendly atmosphere;
- the focus of the project participants' sympathies should be on shared ideas, values, and development processes (opportunities, future, savings);
- the formation of sustainable connections between project participants should take place on two levels: conceptual, rational, and emotional.

If we are talking about the semantic stages that a project of this nature should go through, they should include the following:

- involvement means sharing the same ideas or values as others and a willingness to do something for the common good, not just your own. The task of this stage is to involve as many residents as possible in the processes initiated by the authorities. These are processes that meet the needs of citizens and naturally involve them in joint actions with the authorities;



- engagement – a state of emotional or intellectual sympathy and commitment to a common cause that motivates active participation. The objectives of this stage are to form the social environment for the projects, actions, and initiatives implemented at the first stage, to involve residents (including public authority employees) in joint projects, and to form common values;

- participation – joint activity. The objective of this stage is to engage participants in ongoing active processes that involve their participation. This is the stage of the emergence of shared responsibility for the common cause and its results.

In the implementation of each project, according to the project approach methodology, a unique component, the so-called "entry point" to the project, should be identified: a socio-political situation that would enable the project to be effectively and efficiently perceived by both its participants and stakeholders and the external environment. An open public assessment of the results of the existing system of life support and community management and a new strategic vision of the community's prospects can be used as a tool of this format. The content of the project should be a response to the main systemic problems that characterize the current state of both the management activities of the public management and administration entity and the public-political relations that are currently developing between the management system, the public authority, and the managed system, the territorial community. Therefore, in the authors' personal methodological view, it is advisable to approach the formation of the content of the project stages in the form: of the problem – methodology as a tool for solving it. As for the project stages themselves, it would be advisable to consider the following:

1. Modernizing and updating of the organizational and functional content of a public administration entity and its power activities.

2. Increasing the civic engagement of residents and involving them in joint community management projects with the authorities.

3. Reconfiguring and modernizing the political system of the selected community.

### Conclusions

As a result of the implementation of the proposed integrated project approach to solving typical problems of power and socio-political activities of a public management and administration entity, the following projected results can be discussed:

1. The practical regulation of socio-economic and political processes in a settlement meets the requirements of national and international standards for organizing the activities of public management and administration entities.

2. A public management and administration entity's organizational structure ensures the timely and complete performance of tasks.

3. The quality of management processes and procedures in structural units and the public management and administration entity ensures that tasks are completed fully and on time.

4. Employees of the structural units of the public management and administration entity meet the functional requirements of their positions and ensure that tasks are performed with the specified quality and on time.

5. Management decision-making on the management of a settlement is based on implementing national and international quality standards for the processes, procedures, and content of public services of a public management and administration entity on an open and objective basis.

6. The fulfillment of residents' expectations in the governmental and socio-political spheres is based on an agreed, transparent plan of work of the public management and administration entity.

7. The work of the political system of the settlement is balanced concerning the interests and responsibilities of its participants, open and professional.

8. Residents of the settlement are involved in communication processes with the authorities on a systematic, ongoing, partnership basis and actively participate in managing community resources.

9. The information policy fully satisfies the request of the settlement's residents for timely and sufficient information about the work of the public management and administration entity.

10. The internal assessment by the residents of the settlement of the content of the authorities' activities meets the standard: "The local authorities meet the expectations of quality community management."

11. The external assessment of the content of the authorities' activities in the territorial community meets the standard: "The local authority is an example of professionalism and a model for replication in other territories."

The systemic approach to solving the typical problems of public management and administration entities and their activities proposed in the article allows for formulating the theoretical and methodological content of typical processes of transformation of public authorities' organizational and functional content under the existing challenges.

### Bibliography

1. Половцев О.В. Системний підхід до прийняття рішень в державному управлінні: монографія/ Половцев О.В., [монографія] GlobeEdit Dodo Books Indian Ocean Ltd. member of the OmniScriptum S.R.L Publishing groupe, 2021 p., 207 стор., ISBN 978-620-0-62602-8.

2. Hubbard R., Paquet G. The black Hole of Public Administration. Ottawa: University of Ottawa Press, 2010. 537 p. – P 7.
3. Keeling D. Management in Government / D. Keeling (1972), London: Allen & Unwin.
4. Polovtsev, O. V., Golova, A. V., & Dubin D. L., (2023). Retrospective analysis of socio-political conditions of the transformation process of the functional content of public authority activity. *News of Science and Education, 1*. Retrieved from [https://scieduc.eu/ojs\\_en/index.php/en\\_ojs/article/view/63](https://scieduc.eu/ojs_en/index.php/en_ojs/article/view/63)

#### References

1. Polovtsev, O. V., Golova, A. V., & Dubin D. L. (2023) Retrospektyvnyi analiz suspilno-politychnykh umov transformatsiinoho protsesu funktsionalnoho zmistu diialnosti publichnoi vlady. [Retrospective analysis of socio-political conditions of the transformation process of the functional content of public authority activity]. *News of Science and Education, 1*. [in Ukrainian]. URL: [https://scieduc.eu/ojs\\_en/index.php/en\\_ojs/article/view/63](https://scieduc.eu/ojs_en/index.php/en_ojs/article/view/63)
2. Hubbard R., Paquet G. (2010) The Black Hole of Public Administration. Ottawa: University of Ottawa Press.
3. Keeling D. (1972) Management in Government. London: Allen & Unwin.
4. Polovtsev O.V. (2021) Systemnyi pidkhid do pryiniattia rishen v publichnomu upravlinni [Systemic approach to decision-making in public administration]. GlobeEdit Dodo Books Indian Ocean Ltd. member of the OmniScriptum S.R.L Publishing group. [in Ukrainian].

І. М. ШУПТА

кандидат педагогічних наук, доцент,  
доцент кафедри публічного управління та адміністрування  
Полтавський державний аграрний університет  
ORCID: 0000-0002-8770-5198

## ЕТИЧНІ ДИЛЕМИ В ПРОФЕСІЙНІЙ ДІЯЛЬНОСТІ ТА САМОМЕНЕДЖМЕНТІ ПУБЛІЧНИХ СЛУЖБОВЦІВ В УМОВАХ ВІЙНИ

*Статтю присвячено етичним дилемам в професійній діяльності та самоменеджменті публічних службовців в умовах війни. Увага автора зосереджена на дотриманні правил етичної поведінки в професійній діяльності публічних службовців, що піднімається в сучасних дослідженнях як зарубіжних, так і вітчизняних авторів. Автор висвітлені етичні дилеми, котрі виникають в професійній діяльності та самоменеджменті публічних службовців, особливо в умовах війни. Визначено місце етичних норм серед норм законодавства про публічну службу. Окрім того, у статті здійснено детальний аналіз досвіду таких країн, як Великобританія, Нідерланди, Канада, Китаю та Сполучені Штати Америки у вказаному напрямі, визначено його позитивні риси. Ірина Шупта звертає увагу читача на те, що саме завдяки введенню етичних кодексів та закріпленні в них нормами етичної поведінки державних службовців, а також встановлення моральних санкцій за їх порушення дозволили багатьом країнам суттєво підвищити індекс сприйняття корупції, зокрема до п'ятірки-лідерів увійшли такі країни, як Данія, Фінляндія, Нова Зеландія, Норвегія та Сингапур. Натомість Україна посіла 104 сходинку зі значенням індексу в 36 балів.*

*На думку автора дотримання правил етичної поведінки державними службовцями, дієвість прийнятих кодексів поведінки державних службовців суттєво позначається на репутації та іміджі вказаних вище країн, а також дозволяє підвищити індекс сприйняття корупції у цих країнах. Особлива увага була зосереджена на історії впровадження, проблемах дотримання Загальних правил етичної поведінки державних службовців в умовах війни. Цілом аргументованим є те, що І. Шуптою було запропоновано замість комплексного акту – Загальних правил етичної поведінки державних службовців та посадових осіб місцевого самоврядування – прийняти Кодекс етичної поведінки державних службовців України.*

**Ключові слова:** етична дилема, самоменеджмент, публічний службовець, етизація професійної діяльності, Загальні правила етичної поведінки державних службовців та посадових осіб місцевого самоврядування, Етичний кодекс, Кодекс етичної поведінки державних службовців України.

I. M. SHUPTA

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Public Management  
and Administration  
Poltava State Agrarian University  
ORCID: 0000-0002-8770-5198

## ETHICAL DILEMMAS IN THE PROFESSIONAL ACTIVITIES AND SELF-MANAGEMENT OF PUBLIC SERVANTS IN THE CONDITIONS OF WAR

*The article is devoted to ethical dilemmas in the professional activity and self-management of public servants in wartime conditions. The author's attention is focused on compliance with the rules of ethical behavior in the professional activity of public servants, which is raised in modern research by both foreign and domestic authors. The author highlights the ethical dilemmas that arise in the professional activity and self-management of public servants, especially in wartime conditions. The place of ethical norms among the norms of public service legislation is determined. In addition, the article provides a detailed analysis of the experience of countries such as Great Britain, the Netherlands, Canada, China, and the United States of America in the indicated direction, and its positive features are identified.*

*Iryna Shupta draws the reader's attention to the fact that precisely thanks to the introduction of ethical codes and the norms of ethical behavior of civil servants enshrined in them, as well as the establishment of moral sanctions for their violation, many countries have made it possible to significantly increase the corruption perception index, in particular, the following five leaders are included countries like Denmark, Finland, New Zealand, Norway and Singapore.*

*Instead, Ukraine took the 104th place with an index value of 36 points. In the opinion of the author of compliance with the rules of ethical behavior by civil servants, the effectiveness of the adopted codes of conduct of civil servants significantly affects the reputation and image of the above countries, and also allows to increase the index of perception of corruption in these countries.*

*Special attention was focused on the history of implementation, problems of compliance with the General Rules of Ethical Behavior of Civil Servants in Wartime. The fact that I. Shupta proposed to adopt the Code of Ethical Behavior of*

*Civil Servants of Ukraine instead of the General Rules of Ethical Behavior of Civil Servants and Local Self-Government Officials is quite well-argued.*

**Key words:** *ethical dilemma, self-management, public servant, ethicization of professional activity, General rules of ethical behavior of civil servants and local self-government officials, Code of Ethics, Code of Ethical Conduct of Civil Servants of Ukraine.*

### Постановка проблеми

У сучасних зарубіжних та вітчизняних наукових і навчальних літературних джерелах дедалі більшої уваги приділяється етичним аспектам ділових відносин у сфері публічного управління та адміністрування. Метою даних публікацій є підвищення рівня культури відносин у різних сферах. Для публічних службовців вкрай важливо сформувавши позитивний імідж, адже він визначає ступінь довіри та визнання роботи публічного службовця суспільством, є критерієм оцінювання ефективності програм і перетворень, що проводяться в Україні. Публічний службовець постає в очах громадськості як особа, яка працює в органах місцевого самоврядування, має відповідні посадові повноваження у здійсненні організаційно-розпорядчих та консультативно-дорадчих функцій та отримує заробітну плату за рахунок місцевого бюджету. Тому поведінка посадовців, ставлення до справ громадян формує не лише власний авторитет, проте й авторитет органу публічної влади. У своїй щоденній роботі публічним службовцям доводиться мати справу зі складними етичними рішеннями: від прийняття негрошових нагород до відвідин заходів із політичним контекстом, особистого активізму чи підтримання неупередженості. Ці виклики, що посилені війною в Україні, ще підкреслюють важливу роль дотримання етичних правил поведінки та прийняття прийняти Кодексу етичної поведінки державних службовців України.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання, що пов'язані з етичними дилемами в професійній діяльності та самоменеджменті публічних службовців в умовах війни, на сьогодні вимагають більш детального дослідження, хоча певні аспекти були висвітлені в працях таких вчених, як В. В. Баштанник, О. М. Бериславська, Н. О. Богданова, Т. Е. Василевська, Б. А. Гаєвський, Т. В. Глух, М. І. Лахижа, В. В. Мінаєва, С. З. Мошенський, М. А. Нинюк, Л. В. Прудіус, М. І. Рудакевич, С. С. Сербогін, С. І. Синенко, Н. Г. Сорокіна, І. Г. Сурай, О. В. Токар-Остапенко, О. І. Пархоменко-Кучевіл, Ю. М. Узденова, І. І. Хожило, М. І. Цуркан, І. В. Шпекторенко та інші.

### Формулювання мети дослідження

Метою представленої публікації є дослідження етичних дилем в професійній діяльності та самоменеджменті публічних службовців в умовах війни.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Етична дилема передбачає ситуацію, у якій публічний службовець, здійснюючи той чи інший вчинок, ухвалюючи певне рішення, вимушений визначити для себе пріоритети: нормативи професійної етики або власні моральні переконання, суспільний запит, вимоги керівництва. Виникає запитання, як можуть моральні переконання консультанта або цінності, що культивуються в організації, де він працює, суперечити професійній етиці.

Для публічних службовців поняття етичної поведінки суттєво відрізняється, тому для встановлення єдиних рамок етичної поведінки публічних службовців необхідне їх нормативне закріплення. Важливо розуміти те, яку місце відводиться дотриманню етики в самоменеджменті публічного службовця. Це місце є визначальним, адже самоменеджмент – це саморозвиток особистості, заснований на самопізнанні, самовизначенні, самоврядуванні, самовдосконаленні, подоланні стереотипів свідомості, самоконтролі і, як підсумок, самореалізації в обраній сфері діяльності. Тобто неможливо реалізуватися як професіонал, не дотримуючись етичних правил поведінки. Зрозуміло, що набагато легше діяти правильно, коли знаєш, що це конкретно передбачає. А найбільш чіткою формою опису «правильної» поведінки багато хто вважає їх нормативне закріплення. Так, наприклад, у правовій та етично – правовій літературі можна навіть зустріти такі категоричні ствердження, що відсутність чітких норм у певній галузі є сигналом неблагополуччя. Це має пряме відношення й етичних кодексів.

Питання етизації професійної діяльності (публічної служби) піднімаються доволі давно. Ще в 360 р. до н. е. Платон у четвертій книзі своєї восьмої тетралогії «Держава, чи про справедливість» перерахував властивості ідеальної держави: мудрість, мужність, поміркованість і справедливість. Подібні якості, на думку мислителя, повинні бути притаманні й правителям, відкриваючи їх в своїй душі. Правителі (філософи, за Платоном) повинні мати здібність вбачати ідею (всезагального) блага. Тим самим філософ хотів (скоріше за все) підкреслити першочерговість обов'язку (блага) служіння суспільству над власне механічним виконанням державницьких обов'язків [14].

Арістотель писав: «... трьома якостями повинні володіти ті, хто має наміри займати державні посади: по-перше, співчувати існуючому державному ладу; по-друге, мати великі задатки до виконання обов'язків, пов'язаних із посадою; по-третє, вирізнятися чеснотою та справедливістю, що відповідає кожному різновиду державного ладу» [1; с. 548]. Тобто, кожному публічному службовцю повинні бути притаманні такі риси, як патріотизм, лояльність, порядність, і він чітко повинен уявляти собі, кому він служить.

Великий внесок в дослідженні впливу релігійних засад на формування професійної етики зробив М. Вебер [2]. Так, у своїй праці «Протестантська етика і дух капіталізму», після проведеного порівняння

релігійно-господарської етики Заходу з трудовими традиціями цивілізацій Сходу, він зробив висновок про те, що православна віра нездатна формувати духовні стимули для трудової активності, що піддавалося і піддається критиці багатьма науковцями.

Як показують численні дослідження, одною з головних тенденцій реформування державної служби як на Заході (США, Канада, Великобританія, Франція та ін.), так і Азії (Японія, Південна Корея, Сінгапур та ін.) і Південно-Африканської Республіки є підвищення вимог до етичності службової поведінки публічних службовців. Такий компонент публічного управління, як етичні цінності та гнучкість реагування на потреби громадян, стають дедалі більш значущими. Величезний досвід при створенні різноманітних кодексів етичного регулювання державної публічної служби на всіх рівнях влади дозволили США врахувати всю специфіку суспільства та державного апарату для створення найбільш ефективно-функціонуючого законодавства. Введення Етичного кодексу із закріпленими в ньому нормами етичної поведінки державних службовців, а також встановлення моральних санкцій за їх порушення дозволили США суттєво підвищити індекс сприйняття корупції (73 з 100). За даним показником США займає 24 місце (69 балів) в списку по сприйняттю корупції, в той час як Україна знаходиться на 104 сходинці зі значенням індексу – 36 балів. У п'ятірці лідерів знаходяться такі країни, як Данія, Фінляндія, Нова Зеландія, Норвегія та Сінгапур [9]. Нас також зацікавило і питання щодо результатів інших країн-кандидаток до ЄС. Так, Грузія втратила 3 бали (53 бали, 49 місце), Чорногорія додала 1 бал (46 балів, 63 місце), Молдова додала 3 бали (42 бали, 76 місце), Північна Македонія додала 2 бали (42 бали, 76 місце), Албанія додала 1 бал (37 балів, 98 місце). Натомість показники Сербії за рік не змінилися (36 балів, 104 місце), Боснія і Герцеговина додала 1 бал (35 балів, 108 місце). А от Туреччина набрала найменше з усіх країн-кандидаток в 2023 році. Так, її доробку стало менше на 2 бали (34 бали, 115 місце), і вона ж стала останньою з-поміж усіх претендентів на своє місце в ЄС [9]. Крім того, ми поцікавилися, чи є суттєві відмінності становища України щодо цієї проблеми в інших дослідженнях. Так, у трьох із цих досліджень (Індекс трансформації Фонду Бертельсманна за 2024 рік, опитування думки менеджерів від Світового економічного форуму за 2023 рік, Варіації демократії за 2023 рік) спостерігалось суттєве зростання показника України. Ще за одним (Міжнародний огляд ризиків у країнах групи PRS за 2023 рік) відбулося незначне зниження балів. У решті чотирьох досліджень показники також не змінилися: Звіт «Freedom House» про країни перехідного періоду (період дослідження – 2022 рік) – 35 балів, рейтинг ризиків країн організації «Global Insight» за 2022 рік – 35 балів, Індекс верховенства права відповідно до опитування експертів у лютому-червні 2023 року (проект «Глобальна справедливість») – 33 бали, Рейтинг ризиків країн аналітичного відділу журналу «Економіст» за 2023 рік (станом на вересень 2023 року) – 20 балів [10].

У США ще в 1958 році було прийнято Кодекс поведінки державних службовців (Кодекс етики урядової служби), положення якого пізніше неодноразово уточнювалися й доповнювалися іншими актами, в тому числі й Виконавчим наказом Президента США в 1990 р., яким затверджені «Загальні правила етичної поведінки членів уряду і службовців США», оновлені Актом «Про етику поведінки державних службовців США» у 1978 р. (Ethics in Government Act of 1978), Кодексом етичної поведінки членів Палати представників Конгресу США в 1977 році.

Важливою метою їх прийняття було не лише неухильне виконання правил поведінки (конкретних юридичних і морально-етичних вимог) державних службовців (до таких правил, наприклад, належить обов'язкова підтримка Конституції і законів США), проте й «домогтися повної переконаності кожного громадянина США в чесності та ширості зусиль федерального уряду». Тому від державних службовців вимагається не лише чесно та професійно виконувати свій службовий обов'язок, проте й не допускати дій, що можуть бути витлумачені як порушення. Не зважаючи на недосконалість, ці аспекти виступають в якості серйозного бар'єру на шляху можливих зловживань і стримують розвиток корупції на державній службі.

У Канаді (12 сходинка за індексом сприйняття корупції) діє Ціннісний етичний кодекс державної служби Канади (як нормативний акт Казначейства Канади, що є складовою договору всіх державних службовців) встановлює, що основу діяльності державної служби, її обов'язків та цінностей складають Конституція та закони Канади та принципи відповідального управління. Так, державні службовці зобов'язані не просто дотримуватися законів, але й уникати підозр у негідній поведінці. Зміною культури взаємин державних службовців та громадян при поєднанні етичних та нормативних регуляторів в основному служить реформа державної служби Канади. Система публічного управління Канади є ефективно налагодженою системою, що має високі ціннісні орієнтири [13, с. 121-125; 16].

Натомість Моральний кодекс цивільного службовця Великої Британії (20 місце згідно індексу сприйняття корупції) заснований на необхідності реалізації принципів порядності, чесності, об'єктивності, неупередженості на основі безкорисливості, принципіальності, підзвітності та відкритості діяльності публічних службовців. Зокрема в Кодексі зазначається, що: «чесність» – це коли ти ставиш обов'язки державної служби вище за свої особисті інтереси, «чесність» – це бути правдивим та відкритим, «об'єктивність» – це коли ваші поради та рішення ґрунтуються на ретельному аналізі доказів. «Безпристрасність» означає діяти виключно відповідно до суті справи і однаково добре служити урядам різних політичних переконань» [17].

У сучасному Китаї серед «восьми правил честі та добрості» державних службовців виділяються вимоги служіння народу (про служіння народу) та дотримання дисципліни та законів (порушення законів вважається ганьбою та ганебною справою). Це пов'язано з тим, що спостерігається «змагання з бігу наввипередки» між двома бігунами – з одного боку, реформами, а з іншого – розкладанням і корупцією серед чиновників. Так, У КНР з листопада 2012 року за корупцію покарали 1,34 млн. чиновників з правлячої партії. Близько 50 % з них обіймали посади на сільському рівні та притягнуті до відповідальності за дрібні порушення [11]. Китай займає сорок шосту сходинку (76 балів) за даними дослідження індексу сприйняття рівня корупції.

На нашу думку, доцільно аналогічним шляхом створення Єдиного кодексу етичного регулювання державної громадянської служби до прикладу США слід піти щодо вдосконалення нормативно-правової бази про державну публічну службу, що буде визначати умови поведінки для правомірного і чесного виконання посадовими особами публічних функцій. Цей кодекс також повинен стати джерелом формування окремих кодексів, котрі будуть створюватися на рівні міністерств, відомств та інших органів державної влади та місцевого самоврядування. Основу Єдиного кодексу становлять ключові положення Закону України «Про правила етичної поведінки» [9].

Етичний кодекс, безумовно, має певні переваги у порівнянні зі звичайним юридичним кодексом. Останній вимагає чітких однозначних формулювань, котрі подіють описи конкретних дій (бездіяльності) посадовців. Специфіка ж публічної служби полягає в тому, що створити більш-менш повний і формалізований перелік приписів і заборон неможливо, не говорячи про досить обмежені процесуальні можливості юридично значущого для суду доказу фактів порушень. Натомість в основі етичних кодексів закладені принципи поведінки, відхилення від яких, їх міру і характер набагато легше співвіднести з адміністративною реальністю. Специфіка багатьох очевидних адміністративної провини (наприклад грубої поведінки, прояву неповаги по відношенню до громадян, які звернулися) чи порушення норм політичної етики є такою, що буває вкрай складно довести наявність провини. А без цього неможна застосувати правову санкцію. Моральні ж санкції (в тому числі – моральний осуд колег чи керівників, прийняття до уваги моральних якостей співробітника при вирішенні питання щодо його просування, атестації тощо) в даному випадку є цілком ефективним, ніж наприклад, догана чи позбавлення премії.

Подібний Кодекс повинен містити санкції за порушення встановлених норм етики в сфері публічного управління та адміністрування. Цей Кодекс дозволить сформулювати єдині вимоги до публічних службовців в галузі етики, а також сформулювати основні стандарти їх етичної поведінки. В Україні необхідність у кодифікуванні основних етичних вимог до представників різних гілок державної влади була зумовлена такими потребами: · задля зміцнення довіри громадян; · забезпечення ефективної діяльності державного управління; · удосконалення відносин в державному управлінні; · уніфікації вимог до державних службовців.

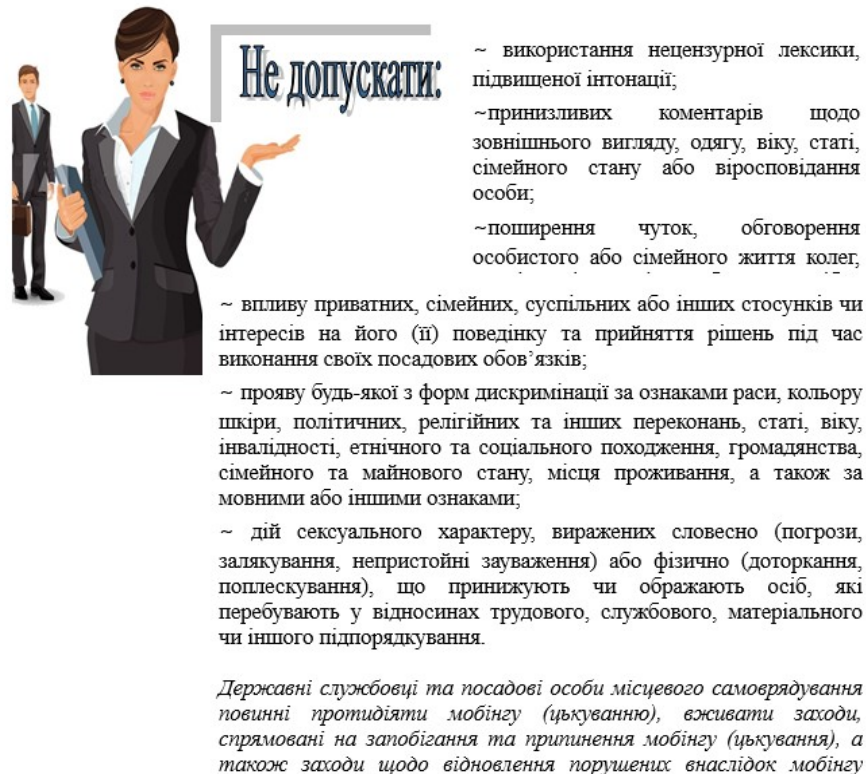
Уперше про необхідність розробки етичного кодексу державної служби в нашій країні заговорили після прийняття Національної програми боротьби з корупцією, котру затвердили Указом Президента у квітні 1997 р. [15]. Саме цією Програмою передбачалося запровадження в Україні Кодексу честі чи Кодексу поведінки державного службовця, а розробленням документу було у сфері компетенції робочої групи, створеною при Центрі правових реформи при Міністерстві юстиції України. Щоправда проект Кодексу основних правил поведінки державних службовців так і не було винесено на парламентське обговорення. А от навесні 2000 року до України, як і до інших країн-членів Ради Європи, надійшов рекомендований Комітетом Міністрів Ради Європи так званий Модельний кодекс державного службовця. Саме, керуючись цим Модельним кодексом фахівці Головного управління державної служби України сформулювали «Загальні правила поведінки державного службовця», затверджені наказом Голодержслужби 23 жовтня 2000 р. та зареєстровані Міністерстві юстиції 7 листопада 2000 р. Зауважимо, що ці правила торкаються також і діяльності представників судової влади, якщо для них не затверджені окремі правила поведінки з урахуванням особливості роботи в цих органах. Натомість діяльність парламентарів в Україні регулюється Регламентом Верховної Ради.

Діяльність публічних службовців в частині дотримання правил етичної поведінки контролюється їх безпосередніми керівниками. Важливо звернути увагу також на таке питання, як добросовісність, що зобов'язує спрямовувати свої дії на захист публічних інтересів та недопущення конфлікту між приватними та публічними інтересами, уникати виникнення реального та потенційного конфлікту інтересів у своїй діяльності; не використовувати службове становище в приватних інтересах чи в неправомірних приватних інтересах інших осіб, у тому числі не використовувати свій статус та інформацію про місце роботи з метою одержання неправомірної вигоди для себе чи інших осіб; не розголошувати інформацію, що стала йому (їй) відома у зв'язку з виконанням посадових обов'язків, зокрема персональні дані фізичних осіб, конфіденційну та іншу інформацію з обмеженим доступом, режим якої встановлено Законами України «Про державну таємницю», «Про інформацію», «Про захист персональних даних» та «Про доступ до публічної інформації», крім випадків, установлених законом [5-8].

Державні службовці та посадові особи органів місцевого самоврядування зобов'язані у своїй поведінці не допускати (рис. 1).

На сьогодні для України органам державної влади та місцевого самоврядування вкрай важливо напрацювати стратегію добросовісності, що буде підтримуватися вищими органами управління завдяки: спільним чи

самостійним проведенням конференцій і лекцій; проведенням семінарів, лекцій і тренінгів; підтримці впровадження стратегії доброчесності та її реалізації.



**Рис. 1. Неприпустимі речі в поведінці державних службовців та посадових осіб органів місцевого самоврядування**

Корисним, на нашу думку, може стати досвід Нідерландів, де починаючи з 2006 року Бюро державної служби вищої ланки (BABD) розробило декілька інструментів, зокрема такі:

– «кубик доброчесності» – мультимедійний інструмент навчання, що пропонує фіктивні робочі ситуації, в яких питання доброчесності пропонуються у вигляді дилем, що потребують розв'язання.

Так, на CD-ROMі зафіксовані відповіді низки осіб на ці дилеми, від рядових громадян до директорів чи менеджерів державних установ. CD-ROM може використовуватися в навчальних цілях;

– SAINT – інструмент самооцінювання доброчесності, що може бути використаний організаціями для визначення головних ризиків і слабких місць. Інструмент SAINT було розроблено спільно з муніципалітетом міста Амстердама та Національною Рахунковою Палатою;

– рамкові положення для проведення адміністративного розслідування (передбачуваних) порушень доброчесності [16].

До прикладу, практичні семінари проводяться в два етапи. В першій половині дня учасники семінару виокремлюють найбільш вразливі робочі процеси за допомогою переліку первинних і додаткових процесів запропонованої до розгляду організації. Потім складається опис найбільш значущих етичних ризиків цих процесів. У другій половині дня здійснюється оцінювання існуючої системи забезпечення доброчесності організації, як з точки зору ефективності, так і з точки зору адекватності. Системи забезпечення доброчесності охоплюють способи захисту від недоброчесності, ризики недоброчесності, а також заходи з впровадження, зміцнення та організації стратегії доброчесності (системні заходи). Приділяється також і увага таким аспектам внутрішньої культури, як усвідомлювання доброчесності та ролі керівництва.

На завершення семінару, під час підсумкової сесії визначаються оптимальні способи захисту (результат другої половини дня) для найбільш вразливих робочих процесів (результат першої половини дня). Для учасників з боку організацій семінари SAINT можуть послужити основою для робочої програми щодо забезпечення доброчесності. Такі семінари адресовані перш за все керівництву організації та показують шляхи покращення стратегії доброчесності.

Максимальна кількість учасників в семінарах складає 14 осіб. Така кількість є достатнім відображенням всього колективу організації. Учасників відбирають в залежності від знання організації в цілому та робочих

процесів зокрема. Коли самооцінювання проводиться для організації в цілому, до групи учасників запрошують людей, які володіють знаннями про основні та додаткові робочі процеси (наприклад, з відділу кадрів, фінансів, аудиту, IT-забезпечення). Набір учасників проводить направляюча організація, в тісній співпраці з Бюро і ведучим семінару. Щодо групи ведучих, то до складу неї входять експерти з різних органів державного управління (так звані «водні спільноти», муніципальної влади, адміністрації місць позбавлення волі тощо) [16].

На нашу думку, факт створення та діяльності такого Бюро заслуговує на увагу та вивчення досвіду, адже його діяльність має вплив на попередження конфлікту інтересів в державній службі та формування необхідних цінностей моральної властивості в галузі державного управління, чого так очікує громадянське суспільство. Окремі положення, зокрема впровадження обов'язку повідомляти про фати недостойної поведінки колег цілком співзвучні з тими антикорупційними заходами, що впроваджуються в Україні.

#### Висновки

У професійній діяльності публічні службовці як наймані працівники мають дотримуватися не лише загальних обов'язків, проте й службових (додаткових) обов'язків, серед яких особливе місце посідають – етичні. Практика та досвід провідних країн із високим індексом сприйняття корупції показує, що значення етичних вимог для публічних службовців у вказаних кодифікованих актах проявляється в тому, що ці акти спрямовані на створення сприятливих умов для зміцнення етичної репутації публічних службовців, підвищення морального авторитету публічної служби, інформування громадян про поведінку, яку слід очікувати від публічних службовців. У разі неприпустимої з точки зору етики поведінки державних службовців вищих органів влади це позначається на іміджі та репутації країни в цілому. Саме встановлення високих морально-етичних вимог для працівників органів державної влади та посадових осіб органів місцевого самоврядування, котрих необхідно дотримуватися в процесі взаємодії з громадянами та колегами буде додатково сприяти створенню позитивного образу публічного службовця та підвищувати престиж його професії в очах громадян.

Система методів етичного регулювання органів державної влади та місцевого самоврядування повинна впроваджуватися поетапно, базуючись на експериментальну роботу та розробку й впровадження нормативних документів і досвіді відповідних виконавців. Беручи до уваги всю новизну, складність та незвичність даної системи для України, війну та роки подальшої відбудови країни, зауважимо, що на її повне впровадження може знадобитися декілька років. Однак, керуючись досвідом зарубіжних країн та необхідності впровадження моральних регуляторів, кінцевий результат, на наше глибоке переконання, зможе окупити всі затрачені ресурси та зусилля.

#### Список використаної літератури

1. Арістотель : Зарубіжні письменники : енциклопедичний довідник : у 2 т. / за ред. Н. Михальської та Б. Щавурського. Тернопіль : Навчальна книга – Богдан, 2005. Т. 1 : А К. С. 63.
2. Вебер М. Протестанська етика і дух капіталізму. К.: Основи, 1994. 261 с. URL: <http://litopys.org.ua/weber/wbr.htm>.
3. Європейський кодекс поведінки для всіх осіб, які залучені до місцевого та регіонального врядування. URL: <https://rm.coe.int/168071b2e5>.
4. Загальні правила етичної поведінки державних службовців та посадових осіб місцевого самоврядування: Офіційний портал Верховної ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1203-16#Text>
5. Закон України «Про державну таємницю» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1994, № 16, ст.93): Офіційний портал Верховної ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3855-12#Text>.
6. Закон України «Про інформацію» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1992, № 48, ст.650) : Офіційний портал Верховної ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2657-12#Text>.
7. Закон України «Про захист персональних даних» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2010, № 34, ст. 481) : Офіційний портал Верховної ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2297-17#Text>.
8. Закон України «Про доступ до публічної інформації» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2011, № 32, ст. 314) : Офіційний портал Верховної ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2939-17#Text>.
9. Закон України «Про правила етичної поведінки» (Відомості Верховної Ради (ВВР), 2013, № 14, ст.94) : Офіційний портал Верховної ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4722-17#Text>.
10. Індекс сприйняття корупції 2023. URL:<https://www.ukrinform.ua/rubric-society/3854442-indeks-spriynattakorupcii-2023.html>.
11. Китай: за корупцію покарали понад мільйон чиновників: За матеріалами Deutsche Welle. URL: <http://surl.li/vvzjgk>.
12. Модельний кодекс поведінки державних службовців країн Ради Європи (схвалено Рекомендацією Кабінету Міністрів Ради Європи Європейським країнам «Про кодекси поведінки для державних службовців», травень 2000 року, № R (2000/10).
13. Овчар Н. П. Особливості здійснення публічного управління в Канаді: *Публічне управління і адміністрування. Державна служба*. Випуск 17. 2020. С. 121-125.



14. Платон. Держава / пер. з дав.-гр. Д. Коваль. К. : Основи, 2000. 355 с.
15. Указ Президента України «Про Національну програму боротьби з корупцією» від 10 квітня 1997 року N 319/97: Офіційний портал Верховної ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/319/97#Text>.
16. Koch R., Dixon J. Public governance and leadership: political and managerial problems in making public governance changes the driver for re-constituting leadership. Gabler Edition Wissenschaft. DUV, 2007. P. 542.
17. Statutory guidance. Civil Service: values and standards of behaviour. URL: <https://www.gov.uk/government/publications/civil-service-code>.

#### References

1. Aristotelj : Zarubizhni pysjmennyky : encyklopedychnyj dovidnyk : u 2 t. / za red. N. Mykhaljskoi ta B. Shhavurskjogho. Ternopilj : Navchaljna knygha – Boghdan, 2005. T. 1 : A K. S. 63.
2. Veber M. Protestansjka etyka i dukh kapitalizmu. K.: Osnovy, 1994. 261 s. URL: <http://litopys.org.ua/weber/wbr.htm>.
3. Jevropejskij kodeks povedinky dlja vsikh osib, jaki zalucheni do miscevogho ta regionalnogho vrjaduvannja. URL: <https://rm.coe.int/168071b2e5>.
4. Zaghaljni pravyla etychnoji povedinky derzhavnykh sluzhbovciv ta posadovykh osib miscevogho samovrjaduvannja: Oficijyj portal Verkhovnoji rady Ukrainy. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1203-16#Text>
5. Zakon Ukrainy «Pro derzhavnu tajemnyciju» (Vidomosti Verkhovnoji Rady Ukrainy (VVR), 1994, # 16, st.93): Oficijyj portal Verkhovnoji rady Ukrainy. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3855-12#Text>.
6. Zakon Ukrainy «Pro informaciju» (Vidomosti Verkhovnoji Rady Ukrainy (VVR), 1992, # 48, st.650) : Oficijyj portal Verkhovnoji rady Ukrainy. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2657-12#Text>.
7. Zakon Ukrainy «Pro zakhyst personalnykh danykh» (Vidomosti Verkhovnoji Rady Ukrainy (VVR), 2010, # 34, st. 481) : Oficijyj portal Verkhovnoji rady Ukrainy. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2297-17#Text>.
8. Zakon Ukrainy «Pro dostup do publichnoji informaciji» (Vidomosti Verkhovnoji Rady Ukrainy (VVR), 2011, # 32, st. 314) : Oficijyj portal Verkhovnoji rady Ukrainy. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2939-17#Text>.
9. Zakon Ukrainy «Pro pravyla etychnoji povedinky» (Vidomosti Verkhovnoji Rady (VVR), 2013, # 14, st.94) : Oficijyj portal Verkhovnoji rady Ukrainy. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4722-17#Text>.
10. Indeks sprjnjattja korupciji 2023. URL:<https://www.ukrinform.ua/rubric-society/3854442-indeks-sprijnatta-korupcii-2023.html>.
11. Kytaj: za korupciju pokaraly ponad milijon chynovnykiv: Za materialamy Deutsche Welle. URL: <http://surl.li/wvzjgk>.
12. Modeljnij kodeks povedinky derzhavnykh sluzhbovciv krajin Rady Jevropy (skhvaleno Rekomendacijeju Kabinetu Ministriv Rady Jevropy Jevropejskym krajinam «Pro kodeksy povedinky dlja derzhavnykh sluzhbovciv», travenj 2000 roku, # R (2000/10).
13. Ovchar N. P. Osoblyvosti zdijsnennja publichnogho upravlinnja v Kanadi: Publichne upravlinnja i administruvannja. Derzhavna sluzhba. Vypusk 17. 2020. S. 121-125.
14. Platon. Derzhava / per. z dav.-ghr. D. Kovalj. K. : Osnovy, 2000. 355 s.
15. Uказ Презыдента Украјины «Pro Nacionaljnu prohramu borotjby z korupcijeju» vid 10 kvitnja 1997 roku N 319/97: Oficijyj portal Verkhovnoji rady Ukrainy. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/319/97#Text>.
16. Koch R., Dixon J. Public governance and leadership: political and managerial problems in making public governance changes the driver for re-constituting leadership. Gabler Edition Wissenschaft. DUV, 2007. P. 542.
17. Statutory guidance. Civil Service: values and standards of behaviour. URL: <https://www.gov.uk/government/publications/civil-service-code>.

## СОЦІАЛЬНІ ТА ПОВЕДІНКОВІ НАУКИ

УДК 330.42 (075.8)

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.48>

І. В. ВИГОДНЕР

старший викладач кафедри інформатики і комп'ютерних наук

Херсонський національний технічний університет

ORCID: 0000-0002-4476-557X

**КОМПЕТЕНТІСНИЙ ПІДХІД ПРИ ВИКЛАДАННІ ДИСЦИПЛІНИ  
«ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ І МОДЕЛІ:  
ОПТИМІЗАЦІЙНІ МЕТОДИ І МОДЕЛІ»**

У роботі розглянуто компетентнісний підхід при викладанні дисципліни «Економіко-математичні методи і моделі: оптимізаційні методи і моделі». Ця дисципліна належить до переліку нормативних навчальних дисциплін та є важливою і невід'ємною складовою підготовки студентів спеціальностей 051 – Економіка, 071 – Облік і оподаткування, 072 – Фінанси, банківська справа, страхування та фондовий ринок. Завданням спеціалістів, якими стануть сьогоднішні студенти цих спеціальностей, буде керування та оптимізація роботи економічних систем, знаходження траєкторії їх розвитку, забезпечення функціонування установ у напрямку максимальної економічної ефективності. Щоб відповідати таким вимогам, необхідно володіти методами математичного моделювання, вміти будувати економіко-математичні моделі, знати методи оптимізації економічних процесів та явищ.

Компетентнісний підхід до підготовки майбутніх економістів, обліківців, працівників банківської сфери, аналітиків сучасного виробництва робить дисципліни математичного циклу своєчасними та затребуваними. «Економіко-математичні методи та моделі» є одним з таких базових курсів. При цьому в сучасних умовах зв'язок теоретичної складової дисципліни та завдань практичної спрямованості стає ще більш актуальним.

Серед основних компетентностей, що набувають студенти вищезначених спеціальностей, виділяють інтегральні, загальні та спеціальні. Для демонстрації, яким чином формуються у студентів названі компетентності, обрано декілька тем: «Постановка задачі математичного програмування. Загальна економіко-математична модель задачі лінійного програмування», «Симплексний метод при розв'язанні задачі лінійного програмування». В ході розв'язання задачі розглянуто економічну інтерпретацію кожного кроку симплексного алгоритму. Наголошено, що задачі оптимізації з великою кількістю чинників доцільно вирішувати за допомогою сучасного інформаційного та програмного забезпечення.

**Ключові слова:** компетентнісний підхід, дисципліни економіко-математичного циклу, економіко-математичні методи і моделі, економічні спеціальності, задача математичного програмування, симплексний метод, практична спрямованість.

I. V. VYGODNER

Senior Lecturer at the Department of General Education, Humanities  
and Natural Sciences

Kherson National Technical University

ORCID: 0000-0002-4476-557X

**COMPETENT APPROACH TO TEACHING THE DISCIPLINE  
“ECONOMICS-MATHEMATICAL METHODS AND MODELS:  
OPTIMIZATION METHODS AND MODELS”**

In this work, the competence approach in teaching the discipline "Economics-mathematical methods and models: optimization methods and models" is considered. This discipline belongs to the list of normative educational disciplines and is an important and integral component of the training of students of specialties 051 – Economics, 071 – Accounting and taxation, 072 – Finance, banking and insurance. The task of today's students of these specialties will be to manage and optimize the work of economic systems, find the trajectory of their development, and ensure the functioning of institutions in the direction of maximum economic efficiency. In order to meet such requirements, it is necessary to master the methods of mathematical modeling, to be able to build economic and mathematical models, to know the methods of optimizing economic processes and phenomena.

Among the main competencies acquired by students of the above specialties, integral, general and special competencies are distinguished. Several topics were chosen to demonstrate how students develop these competencies: "Conceptual aspects of mathematical modeling of the economy. Formulation of the problem of mathematical programming. General

*economic-mathematical model of the problem of linear programming", "Simplex method for solving problems of linear programming". In the course of solving the problem, the economic interpretation of each step of the simplex algorithm was considered. It is emphasized that optimization tasks with a large number of factors should be solved with the help of modern information and software.*

**Key words:** *competence approach, disciplines of the economic-mathematical cycle, economic-mathematical methods and models, economic specialties, the problem of mathematical programming, simplex method, the concept of duality, practical orientation.*

### Постановка проблеми

Однією з умов якісної підготовки майбутніх спеціалістів є компетентнісний підхід до викладання будь-якої навчальної дисципліни. Дисципліна «Економіко-математичні методи і моделі: оптимізаційні методи і моделі» належить до переліку нормативних навчальних дисциплін та є важливою і невід'ємною складовою підготовки студентів спеціальностей 051 – Економіка, 071 – Облік і оподаткування, 072 – Фінанси, банківська справа, страхування та фондовий ринок.

Завданням спеціалістів, якими стануть сьогоднішні студенти цих спеціальностей, буде керування та оптимізація економічних систем, знаходження їх траєкторії розвитку задля досягнення максимальної економічної ефективності. Щоб відповідати таким вимогам, необхідно володіти методами математичного моделювання, вміти будувати економіко-математичні моделі, знати методи оптимізації економічних процесів та явищ.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Поставлені перед сучасними студентами задачі вивчає декілька наук економіко-математичного циклу, одна з них «Економіко-математичні методи і моделі: оптимізаційні методи і моделі», яка охоплює всі етапи вивчення систем, у тому числі економічних: від з'ясування мети (цілі) функціонування й розвитку, побудови економіко-математичної моделі та відшукування оптимального розв'язку до розробки плану практичної реалізації здобутих результатів дослідження та забезпечення реалізації цього плану. При цьому в сучасних умовах зв'язок теоретичної складової дисципліни та завдань практичної спрямованості стає ще більш актуальним. Особливо слід зауважити на актуальність того, щоб студенти вміли застосовувати сучасне інформаційне та програмне забезпечення для отримання та обробки даних у сфері фінансів, банківської справи та страхування.

### Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є виділення основних інтегральних, загальних та спеціальних компетентностей, які набуваються студентами на заняттях з дисципліни «Економіко-математичні методи і моделі: оптимізаційні методи і моделі» та запропонування методів і відповідних завдань для формування даних компетентностей.

### Викладення основного матеріалу дослідження

«Економіко-математичні методи та моделі» є одним з базових курсів, що сприяє формуванню аналітично-дослідницьких компетентностей, які є необхідними для майбутніх економістів, фінансистів, обліківців, аналітиків в умовах сучасного виробництва. Компетентнісний підхід до підготовки таких спеціалістів робить дисципліни математичного циклу своєчасними та затребуваними. При цьому зв'язок теоретичної складової та завдань практичної спрямованості стає ще більш актуальним.

Серед основних компетентностей, що набувають студенти вищезазначених спеціальностей, виділяють інтегральні, загальні та спеціальні компетентності.

Інтегральна компетентність потребує від студента вміння розв'язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми під час професійної діяльності у сфері обліку, аудиту та оподаткування або в процесі навчання, що передбачає застосування теорій та методів економічної науки і характеризується комплексністю, а іноді, й невизначеністю умов.

Загальні компетентності складаються з багатьох чинників. Це здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях; вміння проводити дослідження на відповідному рівні; можливість визначати та описувати характеристики організації; здатність аналізувати результати діяльності організації, зіставляти їх з факторами впливу зовнішнього та внутрішнього середовища; вміння визначати перспективи розвитку організації; можливість відшукувати, обробляти та аналізувати інформації з різних джерел; схильність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу і можливість приймати обґрунтовані рішення.

Важливу фахову роль грають спеціальні компетентності. До них відносять розуміння, як застосовуються економіко-математичні методи для вирішення фінансових задач. Також важливо вміти використовувати сучасне інформаційне та програмне забезпечення для отримання і обробки даних у сфері економіки, фінансів, банківської справи та страхування. Необхідно вміти визначати, обґрунтовувати та брати відповідальність за професійні рішення, досліджувати тенденції розвитку економіки за допомогою інструментарію макро- та мікроекономічного аналізу, робити узагальнення стосовно оцінки прояву окремих явищ, які властиві сучасним процесам в економіці; прогнозувати на основі стандартних теоретичних та економетричних моделей соціально-економічні процеси.

Розглянемо формування компетенцій на прикладі таких тем дисципліни, як «Постановка задачі математичного програмування. Загальна економіко-математична модель задачі лінійного програмування» та «Розв’язання задач лінійного програмування симплексним методом». Перший розділ дає можливість студентам ознайомитися з етапами постановки економічної проблеми та розроблення концептуальної моделі. Етап розроблення математичних моделей – це етап формалізації економічної проблеми, вираження її у вигляді конкретних математичних залежностей і відношень (функцій, рівнянь, нерівностей тощо). Вони вчать чітко формулювати сутність проблеми (цілі дослідження), припущення, що приймаються, і ті питання, на які необхідно одержати відповіді. З урахуванням цілей дослідження проводиться якісний аналіз об’єкта. Відокремлюються, абстрагуючись від другорядних, найважливіші риси і властивості об’єкта, що моделюється. Обираються та обґрунтовуються основні показники й система гіпотез, що пояснюють поведінку та розвиток об’єкта і на основі яких буде відбуватись подальша формалізація. На цьому етапі моделювання широко застосовуються якісні методи описання систем, знакові та мовні моделі.

Наступний розділ дисципліни: «Розв’язання задач лінійного програмування симплексним методом». Симплекс-метод – один із найпопулярніших і найефективніших методів розв’язання задач лінійного програмування. У контексті економічних задач він використовується для оптимізації процесів, максимізації прибутків або мінімізації витрат, розподілу ресурсів, планування виробництва та інших завдань, які можна сформулювати у вигляді лінійних рівнянь і нерівностей. Необхідно відразу акцентувати увагу, що він може бути використаний для довільної кількості невідомих, тобто, є інструментарієм планування економіки підприємства, регіону, країни тощо.

Симплекс-метод – це ітераційна обчислювальна процедура, яка дає змогу, починаючи з певного опорного плану, за скінченну кількість кроків отримати оптимальний план задачі лінійного програмування або з’ясувати, що його не існує. Тому дуже важливо, щоб студенти засвоїли не тільки математичну, тобто, обчислювальну сторону пошуку оптимального плану. До них треба донести, що спрямований перебір допустимих планів, коли на кожному кроці здійснюється перехід від одного опорного плану до наступного, який за значенням цільової функції був би хоча б не гіршим за попередній, змінює значення функціонала (цільової функції) в потрібному напрямку: збільшується (для задачі на максимум) чи зменшується (для задачі на мінімум). Важливо, щоб студент розумів економічну інтерпретацію всіх значень симплексної таблиці протягом кожної ітерації. Критерії оптимальності плану та зміст індексного рядка теж повинні сприйматися як показники ефективності роботи економічної системи, а не як абстрактні цифри деякого алгоритму. Покажемо вищесказане на конкретному прикладі. Не будемо наводити формули для розрахунку значень, вони є в доступі в довільному підручнику з математичного моделювання та відомі студентам з лекційного матеріалу. Зосередимося на економічному змісті цих значень.

**Задача.** Кондитерська фабрика для виробництва трьох видів карамелі *A*, *B* і *C* використовує три види сировини: цукровий пісок, патоку і фруктове пюре. Норми витрат сировини кожного виду на виробництво 1 тонни карамелі даного виду наведені в таблиці 1. Також вказана загальна кількість сировини кожного виду, яка може бути використана фабрикою, та прибуток від реалізації 1 т карамелі кожного виду. Треба знайти такий план виробництва карамелі, який би забезпечив максимальний прибуток від її реалізації [1].

Таблиця 1

Вид сировини	Норми витрат сировини (т) на 1 т карамелі			Загальна кількість сировини (т)
	A	B	C	
Цукровий пісок	0,8	0,5	0,6	800
Патока	0,4	0,4	0,3	600
Фруктове пюре	–	0,1	0,1	120
Прибуток від реалізації 1 т продукції (грн.)	108	112	126	

**Розв’язання.** Складемо математичну модель задачі. Позначимо через  $x_1$  шуканий план виготовлення карамелі *A*, через  $x_2$  – карамелі *B* і через  $x_3$  – карамелі *C*. Оскільки фонд сировини для виготовлення цих трьох видів карамелі обмежений, то змінні  $x_1, x_2, x_3$  повинні задовольняти систему нерівностей:

$$\begin{cases} 0,8x_1 + 0,5x_2 + 0,6x_3 \leq 800, \\ 0,4x_1 + 0,4x_2 + 0,3x_3 \leq 600, \\ 0,1x_2 + 0,1x_3 \leq 120. \end{cases}$$

Загальна вартість виготовленої фабрикою карамелі за умов випуску  $x_1$  т карамелі виду *A*,  $x_2$  т – виду *B* і  $x_3$  т виду *C* становить

$$Z = 108x_1 + 112x_2 + 126x_3.$$

За своїм економічним змістом  $x_1, x_2, x_3$  можуть набувати тільки невід’ємних значень:  $x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0$ .

Таким чином, отримали математичну модель задачі.

Для використання симплексного методу зведемо задачу до канонічного вигляду. Для цього введемо три додаткові змінні  $x_4, x_5, x_6$ , у результаті чого обмеження запишуться у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{cases} 0,8x_1 + 0,5x_2 + 0,6x_3 + x_4 & = 800, \\ 0,4x_1 + 0,4x_2 + 0,3x_3 & + x_5 = 600, \\ & 0,1x_2 + 0,1x_3 + x_6 = 120. \end{cases}$$

$$Z = 108x_1 + 112x_2 + 126x_3 + 0x_4 + 0x_5 + 0x_6 \rightarrow \max$$

*Економічний зміст додаткових змінних.*

Додаткові змінні за економічним змістом означають невикористану за даним планом виробництва кількість сировини того чи іншого виду. Наприклад,  $x_4$  – це невикористана кількість тонн цукрового піску,  $x_5$  – патоки,  $x_6$  – фруктових поре.

Складемо симплекс-таблицю (табл. 2) для першої ітерації, обчислимо значення цільової функції  $Z_0$  і оцінки  $\Delta_j$ , перевіримо план на оптимальність.

Таблиця 2

i	Б	C <sub>σ</sub>	P <sub>0</sub>	108	112	126	0	0	0
				P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>
1	P <sub>4</sub>	0	800	0,8	0,5	0,6	1	0	0
2	P <sub>5</sub>	0	600	0,4	0,4	0,3	0	1	0
← 3	P <sub>6</sub>	0	120	0	0,1	(0,1)	0	0	1
4			Z <sub>0</sub> = 0	-108	-112	-126	0	0	0

Як видно з таблиці 2, значення всіх основних змінних  $x_1, x_2, x_3$  дорівнюють нулю, а додаткові змінні набувають своїх значень у відповідності з обмеженнями задачі. Ці значення змінних відповідають такому плану, при якому нічого не виготовляється, сировина не використовується і значення цільової функції дорівнює нулю. Цей план, звичайно, не є оптимальним.

Це видно із 4-го рядка нашої таблиці:  $\Delta_1 = -108 < 0$ ,  $\Delta_2 = -112 < 0$ ,  $\Delta_3 = -126 < 0$ . Від’ємні числа не тільки свідчать про можливість збільшення прибутку, але й показують, наскільки збільшиться ця сума при введенні в план одиниці того чи іншого виду продукції.

*Економічний зміст індексного (останнього) рядка.*

Від’ємне число  $-108$  означає, що при включенні в план виробництва однієї тонни карамелі А забезпечується збільшення прибутку на 108 грн. Якщо включити в план виробництва по одній тонні карамелей В і С, то прибуток зросте відповідно на 112 і 126 грн. Тому з економічної точки зору найбільш доцільним є включення в план виробництва карамелі С.

Це ж необхідно зробити і на основі формальної ознаки симплексного методу, оскільки максимальне за абсолютною величиною від’ємне число  $\Delta_j$  відповідає вектору  $P_3$ .

Визначимо вектор, який будемо виключати з базису. Для цього складаємо співвідношення.

$$\min \left\{ \frac{b_i}{a_{i3}} \right\} \text{ для } a_{i3} > 0, \text{ тобто } \min \left\{ \frac{800}{0,6}; \frac{600}{0,3}; \frac{120}{0,1} \right\} = \frac{120}{0,1} = 1200.$$

Оскільки мінімум досягається за третім рядком, то з базису виводиться вектор  $P_6$ .

*Економічний зміст проведеної процедури знаходження*  $\min \left\{ \frac{b_i}{a_{i3}} \right\}$ .

Знайшовши число  $\frac{120}{0,1}$ , ми таким чином з економічної точки зору визначимо, скільки тонн карамелі С кондитерська фабрика може виготовити із врахуванням норм витрат і наявних об’ємів сировини кожного виду. Тому що сировини даного виду відповідно є 800, 600, 120 тонн, а на одну тонну карамелі С потрібно витратити сировини кожного виду відповідно 0,6, 0,3, 0,1 т, то максимальна кількість тонн карамелі С, яка може бути виготовлена підприємством, дорівнює  $\min \left\{ \frac{800}{0,6}; \frac{600}{0,3}; \frac{120}{0,1} \right\} = \frac{120}{0,1} = 1200$ , тобто, обмежуючим фактором для виробництва карамелі С є наявний об’єм фруктових поре. З урахуванням його наявності фабрика може виготовити 1200 т карамелі С. При цьому фруктові поре буде повністю використане.

Заповнемо таблицю 3 наступної ітерації за алгоритмом симплексного методу, підрахуємо значення цільової функції  $Z_1$  та оцінки в 4-му рядку.

Таблиця 3

i	Б	C <sub>σ</sub>	P <sub>0</sub>	108	112	126	0	0	0
				P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>
1	P <sub>4</sub>	0	80	(0,8)	-0,1	0	1	0	-6
2	P <sub>5</sub>	0	240	0,4	0,1	0	0	1	-3
3	P <sub>3</sub>	126	1200	0	1	1	0	0	10
4		Z <sub>1</sub> =151200		-108	14	0	0	0	1260

Оскільки в індексному рядку є від’ємне значення  $\Delta_1 < 0$ , то одержаний опорний план  $X = (0; 0; 1200; 80; 240; 0)$  не є оптимальним. Але треба звернути увагу, що цільова функція зросла за своїм значенням.

*Економічний зміст даної ітерації.*

При даному плані виготовляється 1200 т карамелі С і залишаються невикористаними 80 т цукрового піску і 240 т патоки. Прибуток при цьому плані складає 151 200 грн. Розглянемо для прикладу дані стовпчика P<sub>1</sub>. Число 0 у третьому рядку цього стовпчика показує, на скільки слід зменшити виготовлення карамелі С, якщо запланувати випуск однієї тонни карамелі А. Числа 0,8 і 0,4 в 1-му і 2-му рядках вектора P<sub>1</sub> показують відповідно, скільки потрібно цукрового піску і патоки при включенні в план виробництва однієї тонни карамелі А, а число -108 у четвертому рядку означає, що якщо буде заплановано випуск 1т карамелі А, то це забезпечить збільшення прибутку на 108 грн. Такий же зміст мають числа стовпчика P<sub>2</sub>. Дещо інший економічний зміст мають числа, записані в стовпці P<sub>6</sub>. Число 10 у 3-му рядку цього стовпця показує, що збільшення запасів фруктового пюре на 1 т дозволило б збільшити випуск карамелі С на 10 т. При цьому знадобилося б 6 т цукрового піску і 3 т патоки. Збільшення випуску карамелі С на 10 т приведе до збільшення прибутку на 1260 грн.

Із викладеного економічного змісту даних таблиці 3 випливає, що отриманий план не є оптимальним.

Оскільки єдине  $\Delta_1 < 0$ , то P<sub>1</sub> включаємо в базис. Для визначення провідного рядка шукаємо  $\min \left\{ \frac{80}{0,8}; \frac{240}{0,4} \right\} = \frac{80}{0,8} = 100$ . Отже, з базису виключаємо P<sub>4</sub>. Число 0,8 буде ключовим елементом.

Будуємо нову симплекс-таблицю (табл. 4) за алгоритмом симплексного методу, підраховуємо значення цільової функції Z<sub>2</sub> та оцінки в 4-му рядку.

Таблиця 4

i	Б	C <sub>σ</sub>	P <sub>0</sub>	108	112	126	0	0	0
				P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>	P <sub>6</sub>
1	P <sub>1</sub>	108	100	1	-0,125	0	1,25	0	-7,5
2	P <sub>5</sub>	0	200	0	0,15	0	-5	1	0
3	P <sub>3</sub>	126	1200	0	1	1	0	0	10
4		Z <sub>2</sub> =162000		0	0,5	0	135	0	450

Оскільки всі  $\Delta_j \geq 0$  ( $j = \overline{1,6}$ ), то план  $X = (100; 0; 1200; 0; 200; 0)$  буде оптимальним і  $Z_{\max} = 162000$ .

*Економічний зміст.*

Отже, оптимальний план виготовлення карамелі включає виготовлення 100 т карамелі А, 1200 т карамелі С. При даному плані повністю використовується цукровий пісок і фруктове пюре, але залишаються невикористаними 200 т патоки. Прибуток при такому плані складає 162000 грн. Оптимальним планом виготовлення карамелі не передбачено випуск карамелі В. Введення у план виготовлення 1 т карамелі В призвело б до зменшення прибутку на 0,5 грн. (це видно з 4-го рядка стовпчика A<sub>2</sub>).

Ця тема та запропонований підхід до неї розвиває такі компетентності, як вміння розв’язувати складні спеціалізовані задачі та практичні проблеми, які передбачають застосування теорії і методів економічної науки; вміння проводити дослідження на відповідному рівні; здатність визначати та описувати характеристики процесу, аналізувати результати діяльності організації та зіставляти їх з факторами впливу зовнішнього та внутрішнього середовища, визначати перспективи розвитку організації. Студенти вчать формулювати обґрунтовані рішення, мислити абстрактно, аналізувати та синтезувати інформацію. Симплекс-метод розвиває вміння досліджувати тенденції розвитку економіки за допомогою інструментарію макро- та мікроекономічного аналізу, прогнозувати на основі стандартних теоретичних та економетричних моделей соціально-економічні процеси.

Особливо слід зауважити на необхідність розвитку такої компетентності як здатність застосовувати сучасне інформаційне та програмне забезпечення для отримання і обробки даних у сфері фінансів, банківської справи та страхування. Тому доцільно, щоб на практичних заняттях з дисципліни поєднувалися традиційні завдання з усними розрахунками та завдання, розв’язання яких має на увазі застосування програмного забезпечення, такого як Excel, MATLAB, Python та інше.

### Висновки

При викладанні дисципліни «Економіко-математичні методи і моделі: оптимізаційні методи і моделі» необхідно орієнтуватися на розвиток у студентів інтегральних, загальних та фахових компетентностей. Це можливо, якщо поєднати теоретичні засади з завданнями практичного економічного застосування та орієнтувати студентів на проблеми, розв'язання яких потребує використання певного програмного забезпечення.

### Список використаної літератури

1. Вітлінський В.В. Математичне програмування: Навч.-метод. Посібник для самостійного вивчення дисципліни/ В.В Вітлінський, С.І. Наконечний, Т.О. Терещенко. К.: КНЕУ, 2001. 248 с.
2. Буреннікова О.В. Оптимізаційні методи та моделі : навчальний посібник /Н. В. Буреннікова, О. В. Зелінська, І. М. Ушкаленко, Ю. Ю. Буренніков. Вінниця : ВНТУ, 2019. 121 с.

### References

1. Vitlinsky, V., Nakonechnyi, S., & Tereshchenko, T. (2001). *Matematychnе prohramuvannia: Navch.-metod. Posibnyk dlia samostiinoho vyvchennia dysypliny* [Mathematical programming: Educational method. Guide for independent study of the discipline]. K.: KNEU [in Ukraine].
2. Burennikova, N., Zelinska, O., Ushkalenko, I., & Burennikov, Yu. (2019). *Optymizatsiini metody ta modeli : navchalnyi posibnyk* [Optimization methods and models: study guide]. Vinnytsia: VNTU [in Ukraine].

**Т. В. ЧИЖОВА**

кандидат економічних наук, доцент,  
доцент кафедри фінансів, обліку та оподаткування  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-6421-9461

**О. С. НОВОСЬОЛОВА**

кандидат економічних наук, доцент,  
доцент кафедри фінансів, обліку та оподаткування  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-5225-6353

## СУЧАСНА ПРАКТИКА ОПОДАТКУВАННЯ ОПЕРАЦІЙ ІЗ КРИПТОВАЛЮТАМИ

*Розвиток операцій з криптовалютою потребує комплексного підходу, що включає кілька ключових аспектів. Перш за все, необхідно забезпечити чітке правове регулювання, яке визначатиме статус криптовалют, порядок їх використання, а також вимоги до криптовалютних бірж і платіжних систем. Другим важливим елементом є ефективна система оподаткування, яка враховуватиме специфіку операцій з цифровими активами, зокрема, майнінг, трейдинг та інвестування, що допоможе уникнути подвійного оподаткування та інших фінансових складнощів. Стаття присвячена аналізу сучасної практики оподаткування операцій із криптовалютами, що стає все більш актуальним питанням у зв'язку зі зростанням популярності цифрових активів у світі. Автори досліджують підходи до регулювання та оподаткування криптовалют у різних країнах, зокрема в Європейському Союзі, акцентуючи увагу на відмінностях у законодавчих підходах та практичних аспектах застосування податкових норм. У статті детально розглянуто питання, пов'язані з класифікацією криптовалют у податкових системах різних країн. Зокрема, аналізуються різні підходи до визначення криптовалюти як фінансового активу, майна або валюти, що безпосередньо впливає на формування податкових зобов'язань фізичних та юридичних осіб. Особливу увагу приділено оподаткуванню доходів, отриманих від майнінгу, трейдингу та інвестування в криптоактиви, а також труднощам, з якими стикаються податкові органи у зв'язку з децентралізованим характером криптовалют. Також у статті висвітлено проблематику формування єдиних підходів до регулювання криптоактивів на міжнародному рівні, що є необхідним для забезпечення ефективного оподаткування та мінімізації ризиків, пов'язаних з ухиленням від сплати податків через використання криптовалют. На основі проведеного аналізу автори пропонують можливі шляхи вдосконалення податкового законодавства щодо операцій із криптовалютами, зокрема, уніфікацію підходів до їх оподаткування та впровадження нових технологічних рішень для підвищення прозорості та контрольованості криптовалютних операцій. Стаття є корисним джерелом для дослідників, юристів, податкових консультантів та інших фахівців, які працюють у сфері оподаткування та цифрової економіки.*

**Ключові слова:** біржова діяльність, фондовий ринок, оподаткування цифрових активів, криптовалюти, фінансові стратегії, фінансовий ринок, податкове регулювання.

**T. V. CHYZHOVA**

Ph.D. in Economics, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Finance, Accounting and Taxation  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0002-6421-9461

**O. S. NOVOSOLOVA**

Ph.D. in Economics, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Finance, Accounting and Taxation  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0002-6421-9461

## MODERN TAXATION PRACTICE OF TRANSACTIONS WITH CRYPTOCURRENCIES

*The development of cryptocurrency operations requires a comprehensive approach that includes several key aspects. First of all it is necessary to provide clear legal regulation that will determine the status of cryptocurrencies, the procedure for their use, as well as requirements for cryptocurrency exchanges and payment systems. The second important element is an effective taxation system that will take into account the specifics of operations with digital assets,*



*in particular, mining, trading and investing, which will help to avoid double taxation and other financial complications. The article is devoted to the analysis of the modern taxation practice of operations with cryptocurrencies, which is becoming an increasingly relevant issue in connection with the growing popularity of digital assets in the world. The authors examine approaches to the regulation and taxation of cryptocurrencies in various countries, particularly in the European Union, focusing on differences in legislative approaches and practical aspects of the application of tax regulations. The article discusses in detail the issues related to the classification of cryptocurrencies in the tax systems of various countries. In particular, different approaches to the definition of cryptocurrency as a financial asset, property or currency are analyzed, which directly affects the formation of tax obligations of individuals and legal entities. Special attention is paid to the taxation of income received from mining, trading and investing in crypto-assets, as well as the difficulties faced by tax authorities in connection with the decentralized nature of cryptocurrencies. The article also highlights the problem of forming unified approaches to the regulation of crypto-assets at the international level, which is necessary to ensure effective taxation and minimize the risks associated with tax evasion through the use of cryptocurrencies. Based on the analysis, the authors suggest possible ways to improve tax legislation regarding operations with cryptocurrencies, in particular, the unification of approaches to their taxation and the introduction of new technological solutions to increase the transparency and controllability of cryptocurrency operations. The article is a useful resource for researchers, lawyers, tax consultants and other professionals working in the field of taxation and the digital economy.*

**Key words:** exchange activity, stock market, taxation of digital assets, cryptocurrencies, financial strategies, financial market, tax regulation.

### Постановка проблеми

У сучасному світі активне поширення та використання віртуальних активів стає невід'ємною частиною фінансового ландшафту. З розвитком технологій та цифрової економіки, криптовалюти та інші форми віртуальних активів набувають все більшого значення. Це вимагає глибокого дослідження ринку криптовалют, де поняття віртуальних активів виділяється через їх основні ознаки, такі як нематеріальний характер, об'єкт цивільних прав та електронний формат.

Віртуальні активи мають унікальний нематеріальний характер, що означає їх відсутність у фізичній формі. Вони існують виключно в цифровому просторі та можуть бути передані, обміняні або збережені за допомогою комп'ютерних мереж та технологій блокчейн.

Як об'єкт цивільних прав, віртуальні активи мають правову основу, що дозволяє їх використання в різноманітних фінансових операціях, включаючи інвестиції, торгівлю та розрахунки.

Електронний формат віртуальних активів дозволяє зберігати їх у цифрових гаманцях та здійснювати транзакції за допомогою мережі Інтернет. Це значно полегшує доступ до фінансових послуг та розширює можливості для інвесторів та користувачів по всьому світу. Існування віртуальних активів реалізується за допомогою відповідного програмного комплексу, який забезпечує їх безпеку, автентичність та збереження.

Програмний комплекс, що забезпечує функціонування віртуальних активів, включає в себе різноманітні технології та алгоритми, що дозволяють здійснювати безпечні та прозорі транзакції. Важливою складовою цього комплексу є блокчейн-технологія, яка створює децентралізовану базу даних, що записує всі операції з віртуальними активами. Це забезпечує високий рівень захисту від шахрайства та маніпуляцій, а також дозволяє відстежувати всі транзакції в режимі реального часу.

Віртуальні активи також можуть використовуватися як засіб інвестицій та збереження вартості. Їх популярність зростає завдяки можливості отримання високих прибутків, але вони також супроводжуються значними ризиками через високу волатильність ринку. Тому глибоке дослідження ринку криптовалют є необхідним для розуміння механізмів функціонування віртуальних активів та прийняття обґрунтованих фінансових рішень.

У результаті, активне поширення та використання віртуальних активів сприяє розвитку нових фінансових інструментів та підвищенню ефективності фінансових операцій. Вони відкривають нові можливості для інвесторів, підприємців та користувачів, одночасно вимагаючи від них виваженого підходу до безпеки та управління ризиками. Таким чином, віртуальні активи продовжують відігравати все важливішу роль у сучасному фінансовому ландшафті.

Спроби урегулювати сектор віртуальних активів юридично викликають активні дискусії щодо тотожності понять «віртуальний актив» та «криптовалюта». В Україні цей аспект набуває особливої ваги у зв'язку з прийняттям Закону «Про віртуальні активи», що є важливим кроком до легалізації криптобірж та зберігання криптовалюти.

Умови воєнного стану підсилюють потребу в додаткових інвестиціях та розширенні ринку фінансових послуг. В умовах економічної нестабільності та зростання витрат на оборону, країна потребує нових джерел фінансування та інвестицій для підтримки економічного розвитку. Віртуальні активи можуть стати одним з таких джерел, оскільки вони забезпечують можливість швидкого залучення капіталу та здійснення міжнародних фінансових операцій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Аналіз наукових робіт, присвячених віртуальним активам, вказує на те, що на сьогодні відсутнє єдине та чітке визначення термінів у цій галузі, що призводить до численних дискусій серед науковців. Окремі питання функціонування цифрових активів на фінансовому ринку розглядалися такими вченими як: А. Блінов, Т. Завада, І. Спільник, О. Мельниченко, Ю. Тадеєв, О. Фоміна, В. Новицький, В. Устименко, А. Ковальчук, С. Федоров. Проте питання оподаткування цифрових активів так і залишається недостатньо висвітленим.

**Формулювання мети дослідження**

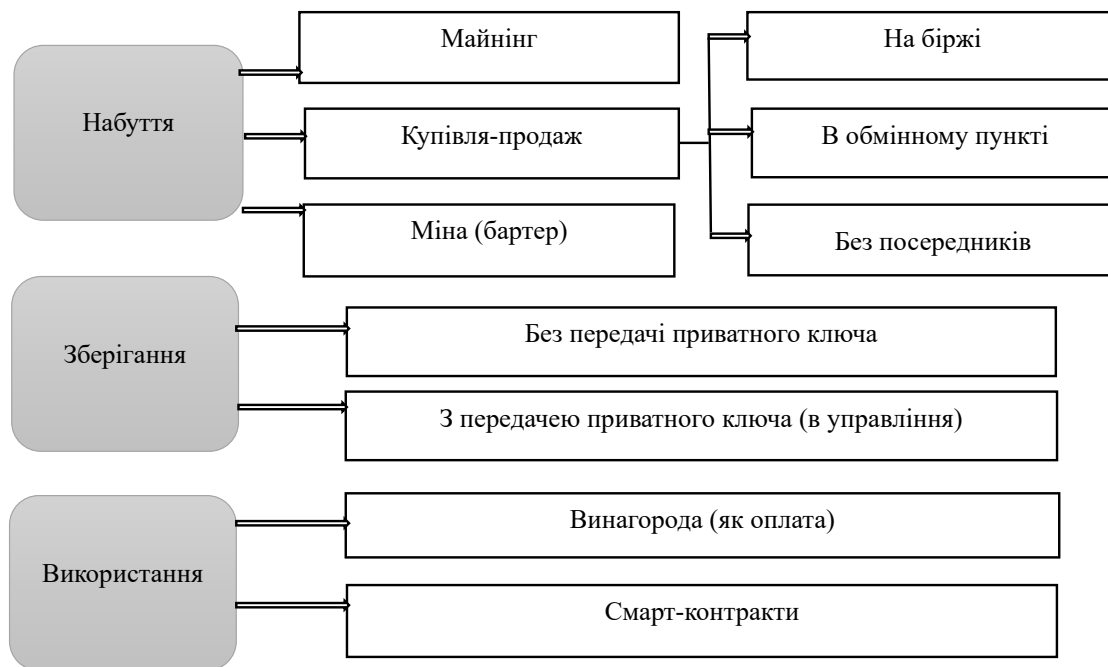
Основною метою статті є докладний аналіз специфіки оподаткування криптовалют у різних юрисдикціях світу. Зокрема, розглядаються відмінності у підходах до оподаткування цифрових активів залежно від правової бази кожної країни. У статті також висвітлюються особливості законодавства, що впливають на визначення криптовалют як активів та їх класифікацію з податкової точки зору. Додатково обговорюються можливі виклики, з якими стикаються країни під час адаптації своїх податкових систем до швидкозмінного ринку криптовалют.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Сучасний глобальний фінансовий ринок стає свідком зростання ролі криптовалют як засобу платежу та інструменту для збереження капіталу. Управління криптовалютами вимагає чіткого визначення їхнього місця в системі економічних відносин. Незважаючи на її широке використання, питання про те, що саме представляє собою криптовалюта, залишаються без однозначної відповіді. Чи є вона специфічним товаром або ж грошима – це досі предмет дебатів. В більшості країн світу криптовалюта наразі не вважається офіційною валютою чи грошовими засобами. Частіше за все її класифікують як нематеріальний актив або товар, і вона не має статусу законного платіжного засобу.

Проте, операції з криптовалютами несуть серйозні ризики, такі як відмивання грошей, фінансування терористичної діяльності та ухилення від сплати податків.

Кожна країна самостійно визначає статус криптовалют згідно зі своїм законодавством, а також встановлює правила щодо їх регулювання та оподаткування. Криптовалюти надають можливість зберігати цінності для майбутніх витрат і використовувати їх для оплати товарів і послуг. Вони слугують інструментом у торговельних операціях, забезпечуючи ефективний обмін між сторонами. Завдяки виконанню основних функцій, які традиційно притаманні грошам, криптовалюти можуть бути розглянуті як форма грошей з функціональної точки зору.



**Рис. 1. Етапи прояву криптовалюти як форми грошей**

Джерело: складено автором за даними [5; 7]

У багатьох країнах світу все частіше постає питання щодо врегулювання операцій з криптовалютами на законодавчому рівні. Використання криптовалют окремими підприємствами для оплати товарів і послуг призвело до того, що їх починають розглядати як децентралізовану валюту. Однак це може виступати, як схема для ухилення

від сплати податків. Через анонімність і складність відстеження транзакцій криптовалюти стають інструментом для уникнення податкових зобов'язань, створюючи виклики для податкових органів у різних країнах.

Для розробки та впровадження ефективних норм оподаткування операцій з криптовалютою доцільно вивчити досвід країн, які вже пройшли цей шлях. Оподаткування цифрових активів істотно різниться в зарубіжних країнах і враховує такі аспекти, як тривалість перебування у власності та специфіка операцій. Це створює складне та динамічне середовище, яке вимагає ретельного аналізу та регулювання для забезпечення стабільності та розвитку цього сектору в міжнародному масштабі.

Досвід країн, які вже впровадили ефективні податкові норми для криптовалют, може стати цінним джерелом інформації для розробки українського законодавства. Розглянемо особливості податкового регулювання операцій із криптовалютами у країнах Європи, які поступово визначають криптоактиви, як засіб платежу (табл. 1).

Таблиця 1

**Податкові режими для криптоактивів в країнах Європи**

Країни	Орган, що здійснює регулювання	Особливості оподаткування
1	2	3
Польща	Основним регулятором цифрового ринку виступає Польська фінансова інспекція (Komisja Nadzogu Finansowego).	З січня 2019-го віртуальні валюти в Польщі оподатковуються корпоративним податком (податком на приріст капіталу) за ставкою 19%. Доходи від операцій із криптовалютами декларуються та розраховуються окремо від інших видів діяльності.
Італія	Основними регуляторами ринку криптовалют в Італії є Центральний банк Італії та Комісія з цінних паперів (Consob).	Фізичні особи можуть вибрати, який податок на криптовалюту вони сплачують, оскільки вони можуть декларувати свій дохід у своїй річній податковій декларації або декларувати вартість свого портфеля криптовалюти 1 січня кожного року. Податки на криптовалюту поділяються на два різновиди: податок на приріст капіталу та податок на альтернативну вартість. Єдина ставка податку на приріст капіталу становить 26%. Податок на віднову вартість має єдину ставку 14%. Будь-яка транзакція, пов'язана з передачею цифрових активів, може стати причиною оподаткованої події. Будь-який прибуток, що перевищує поріг у 2000 євро протягом фінансового року, вважається оподаткованим доходом.
Португалія	Регулятором цифрового ринку виступає Комісія з ринку цінних паперів Португалії (Comissão do Mercado de Valores Mobiliários) – CMVM) Вона координує діяльність фінансових ринків і забезпечує контроль за всіма учасниками ринку, включаючи тих, хто працює з криптовалютами (Cryptoin). Фінансовий моніторинг за діяльністю бірж покладено на Центральний банк Португалії (Banco de Portugal), який відіграє важливу роль у регулюванні криптовалют. Він контролює діяльність фінансових установ і забезпечує фінансову стабільність, що включає моніторинг операцій з криптовалютами і обмінними пунктами.	Податковий кодекс Португалії (Código do IRS) класифікує доходи від криптовалюти на три основні категорії: пасивний дохід (Категорія E), приріст капіталу (Категорія G) та дохід від фрилансу/самозайнятості (Категорія B): 1. Дохід від капіталу (PIT Категорія E). Категорія E охоплює винагороду у фіатній формі від пасивних криптоінвестицій, не заснованих на будь-яких криптовалютних переказах. Ця категорія оподатковується за єдиною ставкою 28%. 2. Дохід від приросту капіталу (PIT Категорія G). Якщо криптоактиви утримуються менше 365 днів, на отриманий прибуток від їх продажу застосовується фіксована ставка податку в розмірі 28%. Однак інвестори можуть включити цей прибуток до свого загального оподаткованого доходу, що дозволяє оподатковувати його за прогресивними ставками, які варіюються від 14,5% до 53%, залежно від загального доходу. Криптоактиви, що утримуються більше 365 днів, повинні декларуватися, але вони звільняються від оподаткування, за винятком певних видів криптоактивів, таких як інвестиційні токени/токени безпеки, які класифікуються як цінні папери і підлягають оподаткуванню незалежно від терміну зберігання. Примітним аспектом є обов'язкове об'єднання приросту капіталу та збитків від операцій з активами, що утримуються менше року, якщо дохід платника податків перевищує 78 834 євро. Також застосовується «податок на виїзд» у розмірі 28% до криптоактивів після припинення податкового резидентства в Португалії, який розраховується на основі ринкової вартості на момент виходу з використанням методу FIFO. 3. Дохід від самозайнятості (PIT Категорія B). Дохід, отриманий від операцій з випуску криптоактивів, таких як майнінг або підтвердження крипто-транзакцій, підпадає під категорію B. Ці доходи оподатковуються за прогресивними ставками від 14,5% до 53%.
Швейцарія	Регулює взаємодійності в сфері криптоактивів Швейцарський парламент та Фінансовий наглядовий орган (Eidgenössische Finanzmarktaufsicht).	Більшість ліцензованих крипто-компаній незалежно від рівня оподаткування сплачують податки: Корпоративний прибутковий (CIT) – 12%-21%. На приріст капіталу (CGT) – 0,001%-0,5%. На додану вартість (ПДВ) – 7,7%. Утримування (WHT) – 35%. У вигляді внесків на соцзабезпечення (SSC) – 0,5%-5,3%. Гербовий збір (ISD) – 1%.

Закінчення табл. 1

1	2	3
Великобританія	У Великій Британії <b>регулювання</b> криптовалют здійснюється кількома основними органами та законодавчими актами. Основну роль відіграє Управління з фінансового регулювання та нагляду (Financial Conduct Authority).	<p>Дохід від криптовалюти у Великобританії поділяється на три категорії: дохід від роботи, дохід від самозайнятості та різний дохід.</p> <p>Власники криптовалюти підпадають під два основні види оподаткування: податок на приріст капіталу (CGT) та податок на доходи (Income Tax).</p> <p>1. Податок на приріст капіталу (CGT): CGT застосовується до продажу, обміну або дарування криптоактивів.</p> <p>У податковому році 2023/2024 податкове вирахування для приросту капіталу становить 6 000 фунтів стерлінгів. Приріст капіталу, що перевищує цю суму, оподатковується за ставкою 10% для основних платників податків і 20% для тих, хто підпадає під вищий податковий діапазон (Blockpit).</p> <p>2. Податок на доходи (Income Tax): Доходи від криптовалюти (наприклад, від майнінгу, від майнінгу або отримані в якості зарплати) оподатковуються відповідно до загальних правил податку на доходи.</p> <p>У 2023/2024 податкові ставки такі: дохід до 12 570 фунтів стерлінгів не оподатковується, дохід від 12 571 до 50 270 фунтів стерлінгів оподатковується за ставкою 20%, від 50 271 до 125 139 фунтів стерлінгів – за ставкою 40%, а понад 125 140 фунтів стерлінгів – за ставкою 45%</p>
Швеція	<b>Регулятором</b> , що контролює сектор, є Шведське управління з фінансового нагляду (Swedish Financial Supervisory Authority).	<p>У Швеції оподаткування операцій з криптовалютою включає кілька основних аспектів:</p> <p>1. Податок на приріст капіталу (Capital Gains Tax): Операції з продажу, обміну або дарування криптовалют підпадають під оподаткування приросту капіталу за ставкою 30%.</p> <p>Для розрахунку приросту капіталу використовується метод середньої вартості придбання (average cost basis method) (Koinly).</p> <p>2. Податок на доходи (Income Tax): Доходи від криптовалюти (наприклад, від майнінгу, зарплати в криптовалюті або винагороди за стейкінг) оподатковуються як звичайний дохід.</p> <p>Ставка податку на доходи в Швеції залежить від муніципалітету, але в середньому становить близько 32%. Високі доходи також підлягають національному податку на доходи за ставкою 20% (Koinly).</p> <p>3. Спеціальні податкові випадки: Безподаткові операції: купівля криптовалюти за шведські крони, холдинг (утримання) криптовалюти, передача криптовалюти між власними гаманцями, дарування криптовалюти та пожертвування криптовалюти не оподатковуються (Koinly).</p> <p>Втрата капіталу: у разі втрат від продажу криптовалюти можна відрахувати 70% цих втрат для зменшення оподаткованого доходу.</p>

Джерело: складено автором за даними [5, 7]

Проаналізувавши досвід оподаткування операцій з криптовалютою в різних країнах світу, можна відзначити, що, незважаючи на різні підходи до трактування природи криптовалют, уряди не ігнорують можливості залучення додаткових джерел фінансування до державних бюджетів. Багато країн почали впроваджувати податки на криптовалютні транзакції, що дозволило не тільки збільшити державні доходи, але й забезпечити нові ресурси для реалізації важливих соціальних і економічних програм. Крім того, оподаткування криптовалютних операцій сприяє підвищенню прозорості криптовалютного ринку, допомагаючи знизити ризики, пов'язані з відмиванням грошей і ухиленням від податків. Цей підхід також сприяє інтеграції криптовалют у загальну фінансову систему, надаючи їм більш легітимний статус і стимулюючи відповідальне їх використання.

У вітчизняній практиці новий закон спрямований на створення правової бази для функціонування ринку віртуальних активів, що включає як криптовалюти, так і інші цифрові активи. Визначення віртуальних активів у законі охоплює широкий спектр цифрових активів, включаючи ті, що функціонують на основі технології блокчейн. Це включає криптовалюти, токени та інші цифрові одиниці, які можуть бути використані для фінансових операцій, збереження вартості або інвестицій.

Закон «Про віртуальні активи» також передбачає створення умов для легалізації та регулювання діяльності криптобірж, що дозволить забезпечити більшу прозорість та захист інвесторів. Легалізація криптобірж сприятиме залученню нових інвестицій, розвитку фінансових технологій та розширенню ринку фінансових послуг в Україні. Це також дозволить забезпечити кращий контроль за дотриманням законодавства та запобігти фінансовим злочинам, таким як відмивання грошей та фінансування тероризму.

Водночас, прийняття Закону «Про віртуальні активи» в Україні є сигналом до міжнародного співтовариства про готовність країни інтегруватися у світовий ринок віртуальних активів та дотримуватися міжнародних стандартів у цій галузі. Це сприятиме покращенню інвестиційного клімату та залученню іноземних інвесторів, які шукають нові можливості для інвестування у перспективні ринки.

Отже, прийняття Закону «Про віртуальні активи» є важливим кроком для України на шляху до інтеграції у глобальний фінансовий ринок та забезпечення правової бази для розвитку ринку віртуальних активів. Це відкриває нові можливості для залучення інвестицій, розвитку фінансових технологій та підтримки економічного

зростання в умовах воєнного стану. Закон сприяє легалізації криптобірж, що забезпечує більшу прозорість ринку та підвищує довіру інвесторів до фінансової системи країни.

Однак, Закон не визначає поняття та умови, необхідні для внесення законодавчих норм в оподаткування прибутку від операцій з криптоактивами. Це створює невизначеність для інвесторів та користувачів криптовалют, які прагнуть зрозуміти свої податкові зобов'язання. Відсутність чітких податкових регуляцій може стримувати розвиток ринку віртуальних активів, оскільки учасники ринку потребують прозорих і зрозумілих правил гри.

### Висновки

Здійснивши аналіз законодавства України та досвіду зарубіжних країн у сфері оподаткування операцій з криптовалютою, можна зробити кілька важливих висновків:

1. Відсутність єдиного підходу: в Україні, як і в багатьох інших країнах, існує значна правова невизначеність щодо статусу криптовалют і правил їх оподаткування. Це створює складнощі для бізнесу та громадян, які використовують криптовалюту, а також ускладнює контроль за податковими зобов'язаннями.

2. Потенціал для збільшення державних доходів: зарубіжний досвід показує, що оподаткування криптовалютних операцій може стати значним джерелом додаткових надходжень до бюджету. У країнах, де були впроваджені чіткі податкові правила, це дозволило збільшити доходи держави та сприяти розвитку економіки.

3. Зміцнення фінансової прозорості: впровадження податкових заходів щодо криптовалютних операцій сприяє підвищенню прозорості фінансових потоків. Це допомагає зменшити ризики, пов'язані з відмиванням грошей і фінансуванням тероризму, оскільки державні органи отримують більше можливостей для контролю за рухом капіталу.

4. Необхідність удосконалення законодавства: українське законодавство потребує суттєвого доопрацювання, щоб відповідати сучасним викликам, пов'язаним із цифровими активами. Врахування досвіду країн, де вже введено ефективні механізми оподаткування криптовалют, може допомогти у створенні нормативно-правової бази, що забезпечить баланс між розвитком інновацій та захистом інтересів держави.

5. Міжнародна співпраця: для ефективного оподаткування криптовалют в Україні необхідно співпрацювати з іншими державами та міжнародними організаціями. Встановлення міжнародних стандартів і обмін інформацією допоможуть уникнути ухилення від податків та забезпечать більш ефективне регулювання цього сектора.

Загалом, для України важливо врахувати як позитивний, так і негативний досвід інших країн, щоб розробити ефективну систему оподаткування криптовалют, яка буде сприяти економічному розвитку та забезпечити фінансову безпеку держави.

### Список використаної літератури

1. Ковальчук О. Адміністративно-правове регулювання ринку криптовалют в Україні. Науковий часопис НПУ імені М. П. Драгоманова. Серія 18. Право. 2021. Вип. 5. С. 32–36.

2. Костюченко В. М., Малиновська А. М., Мамонова А. В. Бухгалтерський облік криптовалют. *Інфраструктура ринку*. 2019. Вип. 3. URL: [http://www.market-infr.od.ua/journals/2019/33\\_2019\\_ukr/52.pdf](http://www.market-infr.od.ua/journals/2019/33_2019_ukr/52.pdf) (дата звернення: 17.07.2024).

3. Онищенко В. Криптовалюти: правовий статус, облік і декларування 2022. *Головбух*. URL: <https://buhplatforma.com.ua/article/9106-kriptoalyuti-pravoviy-status-oblk-deklaruvannya-2021> (дата звернення 20.07.2024).

4. Огляд законодавства що до регулювання віртуальних активів. *Державна служба фінансового моніторингу України*. URL: <https://fiu.gov.ua/assets/userfiles/310/%D0%A0%D1%96%D0%B7%D0%BD%D0%B5/VirtualAssets.pdf> (дата звернення 17.07.2024).

5. Оподаткування операцій з криптовалютою за новим проектом Закону в Україні. *Binance*. URL: <https://www.binance.com/uk-UA/square/post/1673285> (дата звернення 17.07.2024).

6. Про віртуальні активи : Закон України від 17.02.2022 № 2074-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2074-20#Text> (дата звернення 17.07.2024).

7. Посібник зі звітування про криптовалюту щодо податків. *doola*. URL: <https://www.doola.com/uk/blog/guide-to-reporting-crypto-on-taxes/> (дата звернення 15.08.2024).

### References

1. Kovalchuk, O. (2021) [Administrativno-pravove rehulivannia rynku kryptovaliut v Ukraini]. Administrative and legal regulation of the cryptocurrency market in Ukraine. *Naukovyi chasopys NPU imeni M. P. Drahomanova. Series 18. Law*, 5, 32–36 820 [in Ukrainian].

2. Kostyuchenko, V. M., Malinivska, A. M., Mamonova, A. V. (2019) [Bukhhalterskyi oblik kryptovaliut]. Accounting of cryptocurrencies. *Infrastruktura rynku*, 3. Retrieved from [http://www.market-infr.od.ua/journals/2019/33\\_2019\\_ukr/52.pdf](http://www.market-infr.od.ua/journals/2019/33_2019_ukr/52.pdf) [in Ukrainian].

3. Onishchenko, V. (2022) [Kryptovaliuty: pravovy status, oblik i deklaruvannia 2022]. Cryptocurrencies: legal status, accounting and declaration 2022. *Holovbukh*. Retrieved from <https://buhplatforma.com.ua/article/9106-kriptovalyuti-pravoviy-status-oblk-deklaruvannya-2021> [in Ukrainian].
4. [Ohliad zakonodavstva shcho do rehuliuвання virtualnykh aktyviv]. Overview of the legislation on the regulation of virtual assets. *Derzhavna sluzhba finansovoho monitorynhu Ukrainy*. Retrieved from <https://fiu.gov.ua/assets/userfiles/310/%D0%A0%D1%96%D0%B7%D0%BD%D0%B5/VirtualAssets.pdf> [in Ukrainian].
5. [Opodatkuvannia operatsii z kryptovaliutoiu za novym proektom Zakonu v Ukraini]. Taxation of transactions with cryptocurrency according to the new draft of the Law in Ukraine. *Binance*. Retrieved from <https://www.binance.com/uk-UA/square/post/1673285> [in Ukrainian].
6. [Pro virtualni aktyvy : Zakon Ukrainy vid 17.02.2022 № 2074-IX]. On virtual assets : Law of Ukraine dated February 17, 2022 No. 2074-IX. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2074-20#Text> [in Ukrainian].
7. [Posibnyk zi zvituvannia pro kryptovaliutu shchodo podatkov]. Cryptocurrency Tax Reporting Guide. *doola*. Retrieved from <https://www.doola.com/uk/blog/guide-to-reporting-crypto-on-taxes/> [in Ukrainian].

## ПРАВИЛА ПРИЙОМУ СТАТЕЙ

### ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ У НАУКОВИЙ ФАХОВИЙ ЖУРНАЛ «ВІСНИК ХЕРСОНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ»

Поля – 2 см (нижнє) x 2 см (верхнє), 3 см (ліве) x 1,5 см (праве); абзац – 1,25 см; міжрядковий інтервал – 1,5 см; шрифт – Times New Roman; кегль – 14.

Якщо стаття містить таблиці і (або) ілюстрації, то вони повинні бути компактними, мати назву, шрифт тексту – Times New Roman, розмір – 12 пт. Розмір таблиць та ілюстрацій не повинен бути більше ширини сторінки. Таблиці та ілюстрації повинні бути розміщені у відповідному місці в тексті.

#### **Обов'язкові елементи статті:**

- індекс УДК у верхньому лівому кутку сторінки;
- ініціали та прізвище автора великими літерами, науковий ступінь, вчене звання, посада із зазначенням кафедри, місце роботи, ORCID автора у верхньому правому кутку сторінки;
- назва статті великими літерами, по центру (назва статті подається без використання вузькоспеціалізованих скорочень, крапка в кінці назви не ставиться);
- основний текст статті.

#### **Основний текст статті повинен мати такі виділені елементи:**

- постановка проблеми;
- аналіз останніх досліджень і публікацій;
- формулювання мети дослідження;
- викладення основного матеріалу дослідження;
- висновки;
- список використаної літератури.

Після назви статті обов'язково надаються анотації українською та англійською мовами (текст ідентичний, обсяг – не менше 1800 друкованих знаків, включаючи ключові слова), де вказується назва статті, ініціали та прізвище автора, характеристика основної проблеми, мети, узагальнених результатів та ключові слова.

Посилання на літературні джерела в тексті подають у квадратних дужках.

**Список літератури** наводиться у порядку посилань у тексті згідно з ДСТУ 8302:2015. «БІБЛІОГРАФІЧНЕ ПОСИЛАННЯ. Загальні положення та правила складання» і розміщується після основного тексту.

Після списку літератури, через інтервал в один рядок, розташовують слово **References** та наводиться англійський список літератури (стиль – АРА) наведеного вище списку літератури. Бібліографічний опис кожного джерела має, за наявності, супроводжуватися його ідентифікатором цифрового об'єкта (DOI – Digital Object Identifier), що наводиться через пробіл після бібліографічного опису джерела.

## ПРИКЛАД ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

УДК 667.021.1

В. С. КОРОЛЕНКО

кандидат наук з державного управління, доцент,  
доцент кафедри державного управління і місцевого самоврядування  
Херсонський національний технічний університет

ORCID: ...

І. Ф. БОНДАРЬ

аспірант кафедри державного управління і місцевого самоврядування  
Херсонський національний технічний університет

ORCID: ...

**ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ  
ДЕФОРМУЮЧОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ГІДРОПРЕСУВАННІ  
ТРУБЧАТИХ ЗАГОТОВОК МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

*У даній роботі розглянута кінцево-елементна модель процесу гідроекструзії трубчастих заготовок у середовищі високих гідростатичних тисків, необхідних для підвищення пластичності сталі 30ХН2МФА при холодному формоутворенні виробів. Результати моделювання показали можливість реалізувати процес при дії значного гідростатичного тиску (750 МПа) на вільну поверхню заготовки... (не менше 1800 друкованих знаків).*

**Ключові слова:** гідропресування, гідроекструзія, деформування, матриця, моделювання, міцність, надійність, руйнування.

V. S. KOROLENKO

Candidate of Public Administration, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Public Administration and Local Self-Government  
Kherson National Technical University

ORCID: ...

I. F. BONDAR

Postgraduate Student at the Department of Public Administration and Local Self-Government  
Kherson National Technical University

ORCID: ...

**THE RESEARCH OF DEFLECTED MODE OF THE DEFORMING TOOL  
DURING THE HYDRAULIC FORGING OF TUBULAR BLANKS  
BY THE METHOD OF FINITE ELEMENTS**

*In this work, the finite element model of the hydrostatic extrusion process of tubular blanks in the medium of high hydrostatic pressure that are necessary for increase ductility of steel 30HN2MFA during the cold forming products, was considered. The modelling results showed the possibility to realize a process with effect of considerable hydrostatic pressure (750 MPa) on the free surface of blank. There is characteristic destruction still on the initial stages of deformation on the external surface at less pressure. (не менше 1800 друкованих знаків).*

**Key words:** hydraulic forging, hydrostatic extrusion, deformation, mould, modelling, strength, reliability, destruction.

Текст статті...[1, с. 15].

**Список використаної літератури**

1. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів. Львів : Новий світ-2000, 2011. 422 с.
2. Мельничук П. П. Теоретико-технологічне обґрунтування можливостей обробки плоских поверхонь деталей торцевим лезовим інструментом, оснащеним надтвердими матеріалами, замість шліфування. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. № 3. 2014. С. 164-172.

**References**

1. Mazur M.P. (2011) Osnovy teorii rizannia materialiv [Fundamentals of the theory of cutting materials]. Lviv: Noviy svit-2000. [in Ukrainian].
2. Melnychuk P. P. (2014) Teoretyko-tekhnologichne obgruntuvannia mozhlyvostei obrobky ploskykh poverkhon detalei tortsevym lezovym instrumentom, osnashchenym nadtverdymy materialamy, zamist shlifuvannia. [Theoretical and technological substantiation of the possibilities of processing flat surfaces of parts with an end blade tool equipped with ultra-hard materials, instead of grinding]. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky, no. 3, pp. 164-172.



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

Підписано до друку 30.10.2024.

Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman. Папір офсет. Цифровий друк.  
Ум. друк. арк. 45,80. Замов. № 1124/742. 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](mailto:mailbox@helvetica.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.