

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТАВРІЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

*Журнал заснований у 1918 році*

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ  
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

**Серія: Технічні науки**

**Том 35 (74) № 5 2024**

**Частина 2**



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2024

## Головний редактор:

**Кисельов Володимир Борисович** – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського.

## Члени редакційної колегії:

**Медведєв Микола Георгійович** (відповідальний секретар) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Бронін Сергій Вадимович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка;

**Домніч Володимир Іванович** – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Дехтяр Анатолій Соломонович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри архітектурних конструкцій Національної академії образотворчого мистецтва і архітектури;

**Дичко Аліна Олегівна** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Дубко Валерій Олексійович** – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри вищої математики Київського національного університету технології та дизайну;

**Єремєєв Ігор Семенович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Лисенко Олександр Іванович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Огородник Станіслав Станіславович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Сегай Олександр Михайлович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

**Чумаченко Сергій Миколайович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій;

**Цомко Олена** – доктор філософії по спеціальності «Безпека і управління інформацією», відділення комп'ютерної інженерії, Інститут Міжнародної освіти, Університет Донгсо, Республіка Корея.

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet  
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського  
(протокол № 4 від 07.11.2024 року)**

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано відповідно до Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення № 1136 від 11.04.2024 року.

Мови видання: українська, англійська, польська, німецька, французька, словацька, румунська, італійська.

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») з технічних наук (спеціальності: 144. Теплоенергетика, 161. Хімічні технології та інженерія, 172. Телекомунікації та радіотехніка) відповідно до Наказу МОН України від 17.03.2020 № 409 (додаток 1), 121. Інженерія програмного забезпечення, 123. Комп'ютерна інженерія, 126. Інформаційні системи та технології, 151. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 275. Транспортні технології (за видами) відповідно до Наказу МОН України від 02.07.2020 № 886 (додаток 4)

Журнал включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus International (Республіка Польща)

Сторінка журналу: [www.tech.vernadskyjournals.in.ua](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua)

**ISSN 2663-5941 (Print)**

**ISSN 2663-595X (Online)**

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2024

## ЗМІСТ

### ЕНЕРГЕТИКА

**Абдулін М.З., Куник А.А.**

ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ОДНО- ТА БАГАТОПАЛИВНИХ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИЛАДІВ...1

**Дульський А.І., Сірий О.А.**

CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СПАЛЮВАННЯ СУМІШІ МЕТАН-БІОГАЗ  
В СТРУМЕНЕВО-НІШЕВОМУ СТАБІЛІЗАТОРІ ПОЛУМ'Я.....6

**Ярошевич М.В., Соломаха А.С.**

ДОСЛІДЖЕННЯ КАВІТАЦІЙНОГО СОПЛА ТИПУ ТРУБКИ ВЕНТУРИ ДЛЯ ОТРИМАННЯ  
ВОДО-ПАЛИВНОЇ ЕМУЛЬСІЇ.....13

### ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

**Воробйова В.І., Скиба М.І., Лінючева О.В., Васильєв Г.С., Віннічук К.В.**

ОЦІНКА ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ІОННИХ РІДИН НА ОСНОВІ  
ХОЛІН ХЛОРИДУ, БЕТАІНУ ТА ПРОЛІНУ ДЛЯ СТВОРЕННЯ МАТРИЧНИХ ЕЛЕКТРОЛІТІВ  
ДЛЯ СЕНСОРНИХ СИСТЕМ.....20

**Концевой А.Л., Орестова М.В., Концевой С.А.**

ТЕРМОДИНАМІЧНІ І МАТЕРІАЛЬНІ РОЗРАХУНКИ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ.....26

**Майзеліс А.О.**

КАТАЛІТИЧНА АКТИВНІСТЬ СКЛАДОВИХ ШАРІВ МУЛЬТИШАРОВИХ ПОКРИТТІВ  
НА ОСНОВІ СПЛАВІВ NI-ZN-CU У РЕАКЦІЇ ВИДІЛЕННЯ КИСНЮ.....31

**Мельник Л.І.**

ОСОБЛИВОСТІ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ  
З АНДЕЗИТОМ.....37

**Мовчанюк О.М., Остапенко А.А.**

ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ ПАПЕРУ ДЛЯ ГОФРУВАННЯ  
З ВТОРИННОГО ВОЛОКНА КУКУРУДЗЯНИМИ КРОХМАЛЯМИ.....43

**Семичаєвський С.В., Присяжнюк В.В., Володченко М.А.**

ПРО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ЗБЕРІГАННЯ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ.....49

**Скиба М.І., Скиба Ю.М., Залужний Д.С., Воробйова В.І.**

ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ ДІОКСИДУ ТИТАНУ НАНОСРІБЛОМ  
НА ФОТОКАТАЛІТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ: ДЕГРАДАЦІЯ ТЕТРАЦИКЛІНУ ГІДРОХЛОРИДУ....56

### ТРАНСПОРТ

**Akmaldinova V.Ye., Volkovska H.H.**

AVIATION SAFETY ASSESSMENT AND FORECASTING:  
SCIENTIFIC AND PRACTICAL ASPECTS.....63

**Берневек Т.І., Прохоров В.К.**

ІНТЕГРАЦІЯ МОРСЬКОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ  
В ГЛОБАЛЬНІ ТРАНСПОРТНІ МЕРЕЖІ.....68

**Дощенко Г.Г., Наговський Д.А.**

РЕАЛІЗАЦІЯ БЛОКА ПРОСТОРОВО-ВЕКТОРНОЇ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ  
ДЛЯ СУДНОВИХ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ПРИВОДІВ.....73

**Кириллова О.В., Кириллова В.Ю., Магамадов О.Р.**

ПОНЯТТЯ «SMART PORT» У КОНТЕКСТІ ГЛОБАЛЬНИХ ТЕНДЕНЦІЙ ІНТЕГРАЦІЇ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
У ПОРТОВІЙ ІНДУСТРІЇ.....81

**Логінов О.В., Мельник О.М., Волошин А.О., Кучеренко В.Ю., Волошин Д.А., Варлан Т.Є.**

АНАЛІЗ ВИКИДІВ ТА СТРАТЕГІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНИХ АСПЕКТІВ РОБОТИ СУДНА.88

**Решетков Д.М., Ларіна І.М.**

ВПЛИВ ПРОЦЕСІВ ЦИФРОВІЗАЦІЇ НА ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ  
ВАНТАЖІВ І ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ У МОРСЬКИХ ПОРТАХ.....95

<b>Сільванська Г.М., Шибасв О.Г., Петриченко Є.А., Карп Г.В.</b> ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СУЧАСНОГО РИНКУ КРУЇЗНОГО ТА ЛІНЕЙНОГО СУДНОПЛАВСТВА.....	100
<b>Трушевський В.Е.</b> ОСОБЛИВОСТІ РОЗТАШУВАННЯ І ПІДКЛЮЧЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ СВІТЛОФОРІВ ПРИ РЕГУЛЮВАННІ ЗА ОКРЕМИМИ НАПРЯМКАМИ.....	113
<b>Фомін О.В., Баранов І.О., Мірошникова М.В.</b> РОЗРОБКА ДІАГНОСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЮ ГАЛЬМ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ.....	119
<b>Фомін О.В., Шабан В.Є., Баранов І.О., Мірошникова М.В.</b> ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МІЖНАРОДНИХ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ.....	126
<b>ГЕОДЕЗІЯ</b>	
<b>Русіна Н.Г., Біда П.І., Петрова О.М., Кушнірук О.М., Булакевич С.В.</b> ДО ПИТАННЯ ПРО РОЗРОБЛЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЕКТІВ ЗЕМЛЕУСТРОЮ ЩОДО ЗАХИСТУ ЗЕМЕЛЬ ВІД ЕРОЗІЇ В УКРАЇНІ.....	133
<b>ЕЛЕКТРОНІКА</b>	
<b>Палагін В.А., Когдась М.Г., Ситнік В.Ю., Донських О.В.</b> МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ СТРУКТУРИ ПОРУВАТОГО КРЕМНІЯ І МОДУЛЯ ЮНГА.....	140
<b>Терещенко Т.О., Ямненко Ю.С., Кущинський Є.О., Ємець О.О.</b> ПОРІВНЯННЯ АЛГОРИТМІВ СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ НА БАЗІ ВЕЙВЛЕТІВ.....	148
<b>ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ</b>	
<b>Янко А.С., Лактіонов О.І., Михайліченко О.В., Крук О.О.</b> АНАЛІЗ ТА ШЛЯХИ РЕАЛІЗАЦІЇ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ РОЗМІНУВАННЯ НА РОБОТОТЕХНІЧНІЙ ПЛАТФОРМІ.....	155
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	160

# CONTENTS

## POWER ENGINEERING

**Abdulin M.Z., Kunyk A.A.**

SINGLE-FUEL BURNERS AND BURNERS WITH COMBINED FUEL, DIFFERENCES AND FEATURES.....1

**Dulskiy A.I., Siryi O.A.**

CFD MODELING OF THE COMBUSTION PROCESS OF METHANE-BIOGAS MIXTURE IN A JET-NICHE FLAME STABILIZER.....6

**Yaroshevych M.V., Solomakha A.S.**

STUDY OF THE VENTURI CAVITATION NOZZLE FOR OBTAINING A WATER-FUEL EMULSION...13

## CHEMICAL TECHNOLOGY

**Vorobjova V.I., Skiba M.I., Linyucheva O.V., Vasilyev G.S., Vinnichuk K.V.**

EVALUATION OF THE ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF IONIC LIQUIDS BASED ON CHOLINE CHLORIDE, BETAINE, AND PROLINE FOR THE CREATION OF MATRIX ELECTROLYTES FOR SENSOR SYSTEMS.....20

**Kontsevoy A.L., Orestova M.V., Kontsevoi S.A.**

THERMODYNAMIC AND MATERIAL CALCULATIONS OF COAL GASIFICATION..... 26

**Maizelis A.O.**

CATALYTIC ACTIVITY OF CONSTITUENT LAYERS OF MULTILAYER COATINGS BASED ON NI-ZN-CU ALLOYS IN THE OXYGEN EVOLUTION REACTION.....31

**Melnyk L.I.**

FEATURES OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF POLYMER COMPOSITES WITH ANDESITE.....37

**Movchaniuk O.M., Ostapenko A.A.**

INCREASING THE STRENGTH OF PAPER FOR CORRUGATING FROM SECONDARY FIBER WITH CORN STARCH.....43

**Semychaievskiy S.V., Prysiazhniuk V.V., Volodchenko M.A.**

ON QUALITY ASSURANCE OF STORAGE OF INDIVIDUAL PROTECTION EQUIPMENT.....49

**Skyba M.I., Skyba Yu.M., Zaluzhnyi D.S., Vorobiova V.I.**

EFFECT OF TITANIUM DIOXIDE SURFACE MODIFICATION WITH NANOSILVER ON PHOTOCATALYTIC PROPERTIES: DEGRADATION OF TETRACYCLINE HYDROCHLORIDE.....56

## TRANSPORT

**Akmaldinova V.Ye., Volkovska H.H.**

AVIATION SAFETY ASSESSMENT AND FORECASTING: SCIENTIFIC AND PRACTICAL ASPECTS..... 63

**Bernevek T.I., Prokhorov V.K.**

INTEGRATION OF THE MARITIME TRANSPORT SYSTEM OF UKRAINE INTO GLOBAL TRANSPORTATION NETWORKS..... 68

**Doshchenko H.G., Nahovskyi D.A.**

IMPLEMENTATION OF THE SPACE-VECTOR PULSE-WIDTH MODULATION UNIT FOR SHIPS HIGH-SPEED DRIVES.....73

**Kyrylova O.V., Kyrylova V.Yu., Mahamadov O.R.**

THE CONCEPT OF “SMART PORT” IN THE CONTEXT OF GLOBAL TRENDS OF INTEGRATION OF INTELLIGENT TRANSPORT AND INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE PORT INDUSTRY.....81

**Loginov O.V., Melnyk O.M., Voloshyn A.O., Kucherenko V.Yu., Voloshin D.A., Varlan T.Ye.**

EMISSIONS ANALYSIS AND STRATEGIES FOR OPTIMIZING ENVIRONMENTAL ASPECTS OF SHIP OPERATIONS.....88

<b>Reshetkov D.M., Larina I.M.</b> IMPACT OF DIGITALIZATION PROCESSES ON IMPROVING THE QUALITY OF CARGO AND VEHICLE SERVICE IN SEA PORTS.....	95
<b>Silvanskaya G.N., Shibaev A.G., Petrichenko Ye.A., Karp G.V.</b> MAIN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF THE CURRENT CRUISE AND LINER SHIPPING MARKET.....	100
<b>Trushevsky V.E.</b> FEATURES OF THE TRAFFIC LIGHTS REGULATION IN SEPARATE DIRECTIONS LOCATION AND CONNECTION.....	113
<b>Fomin O.V., Baranov I.O., Miroshnykova M.V.</b> DEVELOPMENT OF DIAGNOSTIC SUPPORT FOR NON-CONTACT THERMAL CONTROL OF RAILWAY ROLLING STOCK BRAKES.....	119
<b>Fomin O.V., Shaban V.Ye., Baranov I.O., Miroshnikova M.V.</b> IMPROVING THE EFFICIENCY OF INTERNATIONAL ROAD FREIGHT TRANSPORTATION.....	126

## **GEODESY**

<b>Rusina N.G., Bida P.I., Petrova O.M., Kushniruk O.M., Bulakevych S.V.</b> ON THE QUESTION OF THE DEVELOPMENT OF WORKING PROJECTS BY THE LAND INSTITUTE REGARDING THE PROTECTION OF LANDS AGAINST EROSION IN UKRAINE.....	133
---	-----

## **ELECTRONICS**

<b>Palahin V.A., Kogdas M.H., Sytnik V.Yu., Donskih O.V.</b> A MATHEMATICAL MODEL IS PRESENTED WHICH ELUCIDATES THE RELATIONSHIP BETWEEN THE STRUCTURE OF POROUS SILICON AND THE YOUNG'S MODULUS.....	140
<b>Tereshchenko T.O., Yamnenko Yu.S., Kushchynsky E.O., Yemets O.O.</b> COMPARISON OF IMAGE COMPRESSION ALGORITHMS BASED ON WAVELETS.....	148

## **INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION**

<b>Yanko A.S., Laktionov O.I., Mykhailichenko O.V., Kruk O.O.</b> ANALYSIS AND WAYS OF IMPLEMENTATION OF MINE CLEARING TOOLS ON A ROBOTIC PLATFORM.....	155
INFORMATION ABOUT AUTHORS.....	160

# ЕНЕРГЕТИКА

УДК 662.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/01>**Абдулін М.З.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Куник А.А.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ОДНО- ТА БАГАТОПАЛИВНИХ ПАЛЬНИКОВИХ ПРИЛАДІВ

У статті представлено результати порівняльного аналізу різних видів пальників та технологій спалювання, зокрема тих, що здатні працювати лише на одному виді палива, та тих, що працюють на двох та більше.

На багатьох вогнетехнічних енергетичних об'єктах передбачено використання кількох видів палива, наприклад, природного газу як основного, пропан-бутану як резервного, а мазуту як аварійного. Але на сьогоднішній час існує проблема однаково ефективної організації топкового процесу одним пальниковим приладом для різних видів палива. Для вирішення даної проблеми вже довгий час спеціалісти працюють над розробленням універсальної технології спалювання і, як наступний логічний крок, над впровадженням універсального пальникового приладу. Вирішення цієї проблеми було б доволі корисним для промисловості, особливо у військовий час. Проте, наразі потрібно зрозуміти, чи в цілому використання двох і більше видів палива є економічно та екологічно вигідним, на тривалих проміжках часу. Попередньо проаналізовані дослідження показують, що термін окупності при заміні однопаливного пальника на багатопаливний настає не довше, ніж у випадку модернізації чи заміни будь-якої іншої частини вогнетехнічного об'єкту. А особливо швидко окупаються інвестиції у випадку нестабільності цін на ринку палива, перебоїв в роботі інфраструктури тощо.

У статті досліджено існуючі напрацювання в розвитку технологій універсальних пальникових приладів та досвіду застосування комбінованих пальникових приладів. Проведено порівняльний аналіз, у ході якого було проаналізовано попередні дослідження, та як результат – отримано аналітичні дані стосовно переваг та недоліків обох видів пальникових приладів, як одно-, так і двопаливних. Після чого зроблено висновки, що обидва варіанти мають переваги в деяких характеристиках, є потенційно корисними та актуальними, і подальші роботи повинні вестися в обох напрямках.

**Ключові слова:** паливне господарство, комбіновані пальники, струменево-нишева технологія, універсальна технологія спалювання, аварійне та резервне паливо, екологічна безпека, надійність, воднева енергетика.

**Постановка проблеми.** Нестабільна ситуація в енергетичній сфері штовхає до пошуку шляхів для забезпечення ефективного спалювання різних видів палива за допомогою одного пальникового приладу. При цьому необхідно забезпечити однаково ефективність робочого процесу пальникового приладу, а також часткові режими, без внесення вагомих змін у функціонування паливної інфраструктури та вогнетехнічного об'єкту в цілому.

Проте комбіновані пальники не просто дорожчі та складніші в розробці, монтажі та експлуатації, але

й потребують значного дороблення паливного господарства. Такі процеси модернізації також дорого коштують, підвищують вимоги до безпеки, а після завершення, розширене господарство зазвичай займає більше місця на об'єкті. А у випадку з існуючим вогнетехнічним об'єктом це ще й не завжди можливо, через те, що не в кожному вогнетехнічному об'єкті проектом було передбачено достатньо простору для можливих реконструкцій і т.д.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогоднішній день, існує доволі небагато дослі-

джень присвячених порівнянню комбінованих пальникових приладів та звичайних однопаливних. Такими порівняннями зазвичай займаються компанії виробники комбінованих пальників та підрядні організації, що займаються їх встановленням. Проте, важливо провести такі дослідження саме спираючись на комерційні дані, та з наукової точки зору, звертаючи увагу на існуючі наукові публікації [1, 2].

На даний момент, на ринку представлено немало моделей комбінованих пальникових приладів (Dunphy, Riello, Bentone, Buttner), при чому деякі з них існують вже доволі давно. В основному це пальники призначені для спалювання лише двох видів палива. На жаль досі нема рішення, яке б дозволило однаково ефективно спалювати різні види палива, без внесення конструкційних змін в пальниковий прилад. Для прикладу добре відомі пальники моделі ГМП, що являються яскравим прикладом найбільш поширеної технології спалювання з закруткою потоку окиснювача.

Набагато рідше зустрічаються роботи по універсальній технології спалювання. Серед вітчизняних варто виділити струменево-нишеву технологію розроблену в Національному технічному університеті України «КПІ ім. І. Сікорського», що активно розвивається в напрямку того, щоб стати по справжньому універсальною технологією спалювання, як мінімум газоподібних палив [3, 4, 5].

Окрім комбінованих та універсальних технологій спалювання, останнім часом з'являється все більше наукових робіт присвячених використанню домішок водню. Зокрема, колектив науково-технічних співробітників які працюють над покращенням струменево-нишевої технології також проводять роботи по застосуванню домішок водню, для створення універсальних пальникових приладів [1, 4]. Водень, та пропан-бутан про використання яких в рамках досліджень комбінованих та універсальних пальникових приладів, згадувалося раніше, являються особливо цікавими коли мова йде про ціну, надійність та екологічність паливного господарства, а також розвинену інфраструктуру, та способи зберігання. Частково тому, що водень та пропан-бутан є крайньо вибухонебезпечними видами палива, та потребують особливої пильності та акуратності в їх зберіганні. В свою чергу, залежно від рівня стиснення, пропан-бутанове паливне господарство може вважатися доволі високотехнологічним та потребувати додаткової інфраструктури, фінансування чи великих енергозатрат.

**Постановка завдання. Методи об'єкт та предмет досліджень.** Метод дослідження – ана-

літичні дослідження досвіду застосування комбінованих пальникових приладів, конструкції їх паливного господарства та додаткової інфраструктури. Порівняльне дослідження роботи вогнетехнічних об'єктів на комбінованих та однопаливних пальникових приладів, їх характеристик, таких як ефективність роботи (для комбінованих пальників окремо для кожного виду палива), екологічні параметри, витрати електроенергії на власні потреби і т.д.

Об'єкт дослідження – технології та підходи, що дозволяють спалювати однаково ефективно різні види палива, та інші технології, що розраховані на спалювання одного виду палива.

Предмет дослідження – вогнетехнічні об'єкти, найбільш розповсюджені пальникові прилади комбінованого типу та стандартні, паливні господарства, універсальні струменево-нишові пальникові прилади.

**Виклад основного матеріалу.** Вже доволі довгий час на різних вогнетехнічних об'єктах, а особливо ТЕЦ та котельнях застосовуються пальники здатні спалювати не лише один вид палива. Хоча до цього кілька десятиріч домінували виключно однопаливні пальники та об'єкти. До цього, більшість ранніх печей, перших моделей транспортних засобів і т.д. могли працювати на великому діапазоні палив.

Такий виток історії змушує задуматися, що обидва варіанти як багатопаливний так і однопаливний заслуговують на існування і скоріш за все жоден з них поки не є набагато більш ефективним за інший. Здавалося б, можливість працювати на декількох видах палива є очевидною перевагою, адже підвищує надійність об'єкта. Проте значним мінусом є те, що жодна технологія досі не дозволяє однаково ефективно спалювати два і більше види палива. Крім цього встановлення комбінованих пальникових приладів потребує додаткових інвестицій як в сам пальник, що коштує дорожче, так і в кожне окреме паливне господарство.

Саме тому важливо перед прийняттям рішення про встановлення певного типу пальників на об'єкт, чи перед заміною одного типу на інший, провести детальні розрахунки економічної вигоди від двох варіантів, при цьому враховуючи можливі флуктуації цін на ринку пального, а також враховуючи ряд негативних факторів, що можуть впливати на підприємство. Адже якщо не брати до уваги такі чинники, то майже в будь-якому випадку більш ефективним буде вважатися варіант з одним видом палива, в той час, як дво- або багатопаливні пальникові прилади проявлятимуть



увесь свій економічний потенціал за умови, що враховані, як коливання на ринку, так і можливість виникнення непередбачуваних ситуацій.

Якщо ціна самих паливників не буде відрізнятися, та й самі по собі вони є далеко не найдорожчою складовою енергетичного вогнетехнічного об'єкту, то набагато важливим є правильно прорахувати вартість паливного господарства, та всіх допоміжних систем, наприклад подрібнювачі вугілля (див. рис. 1), чи випаровувачі пропан-бутану (див. рис. 2) і т.д. [2].



Рис. 1. Вугледробильна установка



Рис. 2. Випаровувач пропан-бутану

Використання двох та більше видів палива, для підвищення рівня економічності та надійності, річ далеко не нова. А на даний момент ще й отримала новий виток у популярності. Станом на сьогодні, багато наукових праць, та патентів присвячено використанню двох видів палива різними транспортними засобами, починаючи від автомобілів, де газобалонне обладнання не було нічим новим (а кількість таких машин уже стабільно наближа-

ється до кількості електрокарів та традиційних автомобілів) та закінчуючи гігантськими океанськими лайнерами. В автомобілях зазвичай використовують пропан-бутан та бензин/дизель (див. рис. 3). Типове співвідношення дизелю до газу становить 40/60% для високошвидкісних двигунів. Якщо робоча потужність двигуна постійна і становить 70–80% від номінальної потужності, співвідношення може досягти і 30/70% [6].



Рис. 3. Газобалонне обладнання сучасного автомобіля

Двопаливні паливкові прилади пропонують комбінацію газових і масляних можливостей, забезпечуючи кілька переваг [7]:

1. **Гнучкість використання палива:** двопаливні паливники дозволяють користувачам перемикатися між видами палива, забезпечуючи безперебійну його подачу, навіть якщо одне джерело палива стає недоступним. Така універсальність робить їх привабливими варіантами для галузей промисловості, які прагнуть оптимізувати використання палива та зменшити експлуатаційні витрати.

2. **Енергоефективність:** такі паливники можна налаштувати на роботу з найбільш економічно ефективним джерелом палива, що сприяє ефективності та економії коштів.

3. **Контроль викидів:** такі паливники забезпечують можливість переходу на більш чистий вид палива, саме тоді, коли екологічні норми вимагають негайного зниження викидів.

4. **Економічність:** Можливість перемикання видів палива забезпечує не лише робочу гнучкість і стійкість до збоїв у постачанні палива, але й дозволяє під час коливань цін на різні види палива, сфокусуватися на використанні більш рентабельного.

5. **Адаптивність:** Двопаливні паливники оснащені системами керування, які допомагають комфортно перемикаєти види палива на основі попередньо визначених критеріїв, гарантуючи безперервну роботу та оптимальну ефек-

тивність. Ця адаптивність робить пальники з двома видами палива цінним активом у галузях, де доступність палива та вартість можуть значно відрізнятись.

Двопаливні пальники зазвичай використовуються на електростанціях, в інших промислових котлах, та в технологічних системах опалення. Їхня здатність працювати на різних видах палива робить їх ключовим компонентом систем керування пальниками, що забезпечує плавний перехід між джерелами палива [8, 9].

В цілому, ситуація з двох- та однопаливними пальниковими приладами майже повністю повторює, те як це працює з автомобільними двигунами. Тому коротко пройдемося по двопаливних автомобільних ДВС, а саме по їх перевагах:

**1. Ефективність:** найбільшою перевагою двопаливної системи є те, що завжди використовується найефективніше паливо для завдання, тому ці системи значно ефективніші для роботи понаднормово порівняно з однопаливним двигуном. Зберігання палива також спрощене, дозволяючи збільшити час між заправками дизеля або зменшити розмір необхідних резервуарів для зберігання.

**2. Екологічність:** обмеження спалювання дизельного палива, як це робить двопаливний генератор або інший двигун, може значно знизити кількість твердих часток,  $\text{CO}_2$  та інших викидів, що викидаються в атмосферу. Вони також можуть допомогти у вловлюванні спаленого газу, використовуючи побічні продукти, які інакше були б викинуті даремно.

**3. Економія коштів:** різниця у витратах на паливо може досягати 50% порівняно з однопаливною системою.

**4. Довший час роботи:** під час тривалих відключень електроенергії оператори можуть підтримувати роботу критично важливих програм довше, не будучи настільки залежними від дизельного палива [10].

Як ми говорили раніше, двопаливні рішення, застосовують не лише в наземному транспорті та в енергетичних об'єктах, але й на кораблях, від малих, до гігантських.

Природно, корабель, який працює на більш ніж одному паливі, має свої власні труднощі, які потрібно подолати. Зрештою, ніколи не буде просто долити в бак дизельного палива альтернативне паливо, наприклад аміак, і відправитися на зворотний шлях. Як правило, двопаливні кораблі повинні бути розроблені такими з самого початку,

щоб підтримувати більше ніж один тип палива (див. рис. 4). Це тому, що двопаливне судно – це щось більше, ніж просто двигун. Для початку має бути місце для двох окремих паливних баків. Для цього також потрібні відповідні паливопроводи, системи кондиціонування, які контролюють тиск і температуру, а також фільтри для двох різних видів палива.



Рис. 4. Перше двопаливне судно класу Megamax

Запобіжні заходи, пов'язані з безпекою, також необхідно враховувати та впроваджувати, особливо коли мова йде про паливо з більш особливими вимогами до зберігання, наприклад аміак. Крім того, є сам двигун, для якого потрібні дві різні системи впорскування через специфічні властивості палива, включаючи рівні тиску, діаметри сопел і конструктивні особливості системи впорскування. Двигун також повинен адаптуватися до різних процесів згорання.

Протягом наступного десятиліття і більше ми, ймовірно, побачимо, що інфраструктура для різних видів палива розвиватиметься різними темпами. Це означає, що доступність більш стійких видів палива значною мірою залежатиме від місця розташування та ресурсів. Протягом цього часу кораблі, що працюють на двох паливах, можуть відігравати все більшу роль у переході від дизеля до більш екологічних видів палива [12].

**Висновки.** Використання двох та більше видів палива на одному й тому ж об'єкті без внесення змін в його конструкцію є складною задачею. Це потребує доволі ретельних розрахунків робочого режиму пальника, чи двигуна внутрішнього згорання. Проте, існує багато об'єктів, де застосування двох та більше видів палива, не лише оправдане, але й потенційно, значно покращує економіко-екологічно показники.

## Список літератури:

1. Абдулін М.З., Куник А.А., Сірий О.А. Підвищення реакційної здатності природного газу та пропан-бутану. Збірник праць: "Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики" – Київ, 2023 р.
2. Абдулін М.З., Куник А.А., Кобилянська О.О. Нові види резервного та аварійного палива. Збірник праць: «Проблеми екології і експлуатації об'єктів енергетики» – ППЦ Алкон НАН України – Київ, 2020. 192с.
3. Абдулін М. З. Розроблення теплофізичних засад технологій спалювання палив із застосуванням струменево-нишових систем: дис. д.т.н.: Київ 2019. 83 с.
4. Абдулін М.З., Сірий О.А. Дослідження енергетичних показників струменево-нішової системи спалювання палива. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. (Ulrich's Periodicals Directory, ВІНІТІ). Харків. 2018. № 12/1288. С. 89-94.
5. Сірий О. А. Вплив параметрів струменево-нішової системи на робочий процес пальникових пристроїв : дис. канд. техн. наук. : 05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки. Олександр Анатолійович Сірий. – Київ, 2016. – 198 с.
6. Natural Gas for High Horsepower (ННП) Summit. ННП Summit. URL: <https://www.hhpsummit.com> (дата звернення: 25.06.2024).
7. Which Burner; Gas, Oil, or Dual Fuel Burners – UKHVAC. UKHVAC. URL: <https://ukhvac.co.uk/which-burner-gas-oil-or-dual-fuel-burners/#:~:text=Fuel%20Flexibility:%20Dual%20fuel%20burners,promoting%20efficiency%20and%20cost%20savings> (дата звернення: 25.06.2024).
8. Choosing the Right Type of Industrial Burner. Filter. URL: <https://filter.eu/choosing-industrial-burners/> (дата звернення: 25.06.2024).
9. Industrial oil and gas dual fuel burner\_bntet burner. Boiler Gas burner,diesel burner,Biomass burner,light heavy oil burner,rotary kill burners,Asphalt plant burner,low temp burner,line burner,china Industrial burner-Bntet burner. URL: <https://bntet-burner.com/news/Industrial-oil-and-gas-dual-fuel-burner.html> (дата звернення: 25.06.2024).
10. 5 Things You Didn't Know About Bi-Fuel and Dual-Fuel – New & Used Generators, Ends and Engines. Houston, TX. Worldwide Power Products. Commercial & Industrial Generators. Houston, TX. Worldwide Power Products. URL: <https://www.wpowerproducts.com/blog/generator-engine-fuels/5-things-you-didnt-know-about-bi-fuel-and-dual-fuel/#:~:text=Efficiency:%20The%20greatest%20advantage%20of,as%20a%20gas-powered%20car.> (дата звернення: 25.06.2024).
11. Daley J. Two Fuels Are Better Than One. Illinois Tech Magazine. URL: <https://magazine.iit.edu/fall-2017/two-fuels-are-better-one> (дата звернення: 25.06.2024).
12. Present and future fuels in the shipping industry: Dual Fuels. Accelleron – The future of turbocharging today. URL: <https://accelleron-industries.com/charge-magazine/present-and-future-fuels-in-the-shipping-industry-dual-fuels> (дата звернення: 25.06.2024).

### Abdulin M.Z., Kulyk A.A. SINGLE-FUEL BURNERS AND BURNERS WITH COMBINED FUEL, DIFFERENCES AND FEATURES

*The article presents the results of a comparative analysis of different types of burners and combustion technologies. Namely, those that can work on only one type of fuel, and those that work on two or more.*

*At many fire-engineering power facilities, the use of several types of fuel is provided, for example, natural gas as the main fuel, propane-butane as a reserve, and oil as an emergency fuel. But today there is a problem of equally effective organization of the combustion process with one burner device for different types of fuel. To solve this problem, specialists have been working for a long time on the development of a universal combustion technology and, as the next logical step, on the introduction of a universal burner device. However, at the moment, it is necessary to understand whether, in general, the use of two or more types of fuel will be economically and environmentally beneficial. Previously analyzed studies show that the payback period is not much longer than in the case of modernization/replacement of any other part of the fire engineering facility. And investments are paid off especially quickly in the case of instability on the fuel market, and/or infrastructure disruptions and similar cases.*

*The article examines existing developments in the development of combustion, the creation of technologies of universal burner devices and the experience of using combined burner devices. A comparative analysis was conducted, during which previous experiments were analyzed, and as a result, analytical data was obtained regarding the advantages and disadvantages of both types of burner devices. After that, it was concluded that both options have advantages in some characteristics, are potentially useful and relevant, and further work should be conducted in both directions.*

**Key words:** fuel management, combined burners, jet-niche technology, universal combustion technology, emergency and reserve fuel, hydrogen energy.

**Дульський А.І.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Сірий О.А.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## CFD-МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СПАЛЮВАННЯ СУМІШІ МЕТАН-БІОГАЗ В СТРУМЕНЕВО-НІШЕВОМУ СТАБІЛІЗАТОРІ ПОЛУМ'Я

Використання біогазу в енергетиці пропонує численні переваги, включаючи можливість використання відновлюваних джерел енергії. Це стає дедалі важливішим у контексті глобальних зусиль щодо зменшення залежності від викопного палива, особливо на фоні зростаючого попиту на енергоресурси. Однак високий вміст  $\text{CO}_2$  у біогазі створює певні виклики для процесу згоряння, серед яких одним із найсуттєвіших є зниження нормальної швидкості поширення полум'я, яка у біогазу становить лише 15–25 см/с, що негативно впливає на стабілізацію факелу. Це робить дослідження у сфері горіння біогазу перспективними, оскільки вони сприяють розвитку технологій, які можуть забезпечити більш ефективне використання цього виду палива в енергетичних установках.

Стаття присвячена моделюванню процесу горіння метано-біогазової суміші в струменево-нішевій системі (СНС) спалювання та стабілізації палива. Для створення CFD-моделі використано сучасні програмні засоби для моделювання. У статті розкрито вплив геометричних та режимних параметрів СНС на процес горіння при різних співвідношеннях компонентів метан- $\text{CO}_2$ .

Зокрема, встановлено, що додавання 30%  $\text{CO}_2$  до метану суттєво змінює гідродинамічний параметр  $q$ , збільшуючи його з 11,877 до 23,3 при незмінній геометрії стабілізатора. З'ясовано, що це також призводить до зниження пікової температури (до  $140^\circ\text{C}$ ), що є важливим фактором для зменшення викидів шкідливих речовин, таких як  $\text{NO}_x$ . Визначено, що зниження викидів  $\text{NO}_x$  при додаванні 30%  $\text{CO}_2$  становить приблизно 40% у порівнянні з чистим метаном, що є вагомим досягненням у контексті екологічної безпеки.

У статті також акцентовано увагу на необхідності збільшення витрати біогазу для досягнення теплової потужності, еквівалентної тій, що забезпечується при спалюванні природного газу, та розглянуто проблеми, які виникають внаслідок цього, з наданням рекомендацій щодо їх вирішення.

**Ключові слова:** Біогаз, метан- $\text{CO}_2$  суміш, CFD-модель, струменево-нішева система, розподіл температур.

**Постановка проблеми.** У сучасних умовах надмірне використання традиційних палив та негативний вплив парникових газів на довкілля сприяли посиленню досліджень у сфері виробництва відновлюваної енергії з органічних ресурсів та відходів. Світовий попит на енергію залишається високим, причому більшість енергії виробляється з викопних ресурсів. Останні дослідження свідчать про те, що анаеробне бродіння є альтернативною та ефективною технологією, яка поєднує виробництво біопалива та стійке управління відходами. Біогаз – це суміш, що складається з двох третин метану ( $\text{CH}_4$ ) і решти, переважно, діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) з домішками сірководню. Відпрацьована суспензія після виробництва біогазу може бути збагачена для використання як добриво для

сільськогосподарських культур, що сприятиме стійкому виробництву біомаси у світі.

Потенціал України у розвитку виробництва біогазу є величезним. Відмінну сировинну базу для цього створюють відходи добре розвиненого сільського господарства нашої країни. Біогаз має широкий спектр можливих форм використання (опалення, електрика та паливо). Одним з яких є його використання в сучасних технологіях спалювання як домішки до основного палива, з метою часткового заміщення традиційного палива [1, 2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На практиці багато європейських країн успішно інтегрували біогаз у свої енергетичні сектори через різні шляхи використання. Щорічне виробництво енергії з біогазу становить близько 42 ТВт-год

у Німеччині (найвищий показник у ЄС), 9 ТВт-год у Великобританії та 2,8 ТВт-год у Франції; в кожній з цих країн біогаз в основному використовується для виробництва електроенергії. У Швеції виробляється близько 1,7 ТВт-год з біогазу, і 44% виробництва біогазу очищується до біометану і використовується як паливо для транспортних засобів. В Італії біогаз в основному використовується для виробництва електроенергії, тоді як інші шляхи, такі як введення в газову мережу та комбіноване виробництво тепла та електроенергії [3].

Біогаз в основному складається з метану та діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) з деякими домішками. Його склад, однак, змінюється залежно від методу бродіння, часу утримання в бродильнику та типу біомаси. Загалом, відсоток метану (за об'ємом) у складі біогазу може варіюватися від 45% (приблизно 55%  $\text{CO}_2$ ) до 80% (приблизно 20%  $\text{CO}_2$ ) та інших газів в набагато меншому відсотковому співвідношенні (в основному  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2$  – до 3% разом). Однак типовий склад біогазу це до 70% метану і 40%  $\text{CO}_2$  за об'ємом. Біогаз в порівнянні з іншими альтернативними паливами має відносно високу теплоту згорання до 25 МДж/м<sup>3</sup> [2].

Варто зазначити, що значна кількість діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) в біогазі впливає на його щільність, теплотворну здатність та нормальну швидкість поширення полум'я (у біогазу 15–25 см/с, у природного газу 38 см/с). Чим нижча нормальна швидкість розповсюдження полум'я тим більшу увагу потрібно звертати на стабілізацію факелу щоб уникнути його зриву. Також зміна щільності газу спричиняє зміну витрати пального, який проходить через отвори пальника, що призводить до зміни швидкості витікання газу через сопла та отвори пальників. Це також змінює аеродинамічні умови змішування газу з дуттьовим повітрям та впливає на повноту згорання та теплову потужність пальника. При цьому додавання  $\text{CO}_2$  знижує температуру продуктів згорання, що сприяє зменшенню викидів  $\text{NO}_x$  [1, 3].

Згідно з [5] ефективність робочого процесу паливоспалювального устаткування визначається технологією спалювання палива. Належна організація технологічного процесу паливоспалювальних систем забезпечує ефективність використання енергоресурсів та надійність устаткування. Перспективними є пальникові пристрої, розроблені в КПІ ім. Ігоря Сікорського, зокрема ті що реалізують Струменево-нішеву технологію спалювання (СНТ) (рис. 1, а). Основні принципи СНТ включають:

- ефективний розподіл палива в потоці окиснювача;

- стабільну регульовану структуру течії палива, окиснювача і продуктів згорання;

- саморегулювання складу паливної суміші в зоні стабілізації факелу;

- ефективне самоохолодження пальника;

- попередній підігрів пального [5].

Актуальним напрямом подальшого розвитку зазначеної технології є визначення можливості спалювання альтернативних палив, або їх суміші з природним газом в пальниках СНТ.

Робочий процес пальників СНТ визначається ефективністю роботи гідродинамічного стабілізатору полум'я – струменево-нішевою системою (СНС) (рис. 1, б).

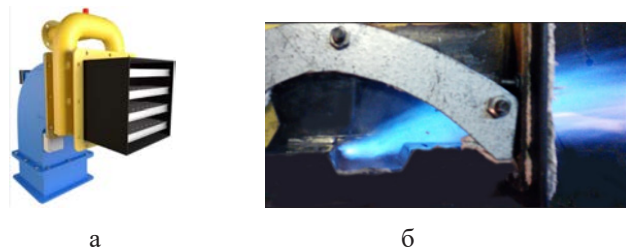


Рис. 1. Струменево-нішева технологія спалювання палива: а – пальник, б – горіння поодинокого струменю в (СНС)

**Постановка завдання.** Метою роботи є імітація процесів спалювання сумішшю метан-біогазу, у струменево-нішевій системі стабілізації та горіння палива за допомогою CFD-моделювання, з ціллю визначення сприятливих геометричних та режимних параметрів. Це дозволить зробити аналіз впливу: геометричних параметрів СНС, різних співвідношень метану-біогазу на характеристики горіння та емісійні показники. Результати роботи будуть корисними при підготовці до проведення експериментальних досліджень на вогневому лабораторному стенді.

**Виклад основного матеріалу.** Розроблена CFD-модель з геометрією СНС (рис. 2) та підібраними граничними умовами і математичними моделями дозволяє наближено симулювати процес спалювання суміші в СНС, відображаючи основні характеристики цього процесу.

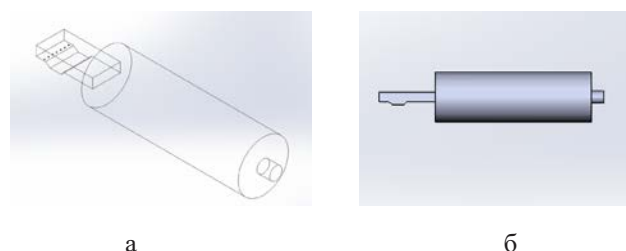


Рис. 2. 3D модель розрахункової області струменево-нішевого стабілізатора полум'я та високотемпературної камери (а) – каркасне представлення з відображенням всіх кромки (б) – зафарбоване з відображенням всіх кромки

Для розрахунку було обрано неявний алгоритм встановлення (Pressure Based Implicit). Модель розглядалася в стаціонарному режимі (Steady) для зменшення витрат ресурсів і часу, необхідних для вирішення. В якості моделі турбулентності обрана Realizable k-ε модель. Це дворівнева модель турбулентності, що дозволяє визначати як турбулентну довжину, так і часову шкалу шляхом розв'язання двох окремих транспортних рівнянь. Термін Realizable означає, що модель задовольняє певним математичним обмеженням напружень Рейнольдса, що узгоджується з фізикою турбулентних течій. Ця модель була ретельно протестована для широкого спектру потоків включаючи обертові однорідні зсувні потоки, вільні потоки, включаючи струмені і шари змішування, потоки в каналі і приміжевому шарі, а також розділені потоки. У всіх цих випадках було підтверджено ефективність і доцільність її використання [6].

Теплофізичні характеристики кожного компоненту реакції були розраховані з використанням бази даних Fluent. В якості моделі горіння обрана модель Species Transport з урахуванням дифузії. Реакція є об'ємною, а взаємодії між турбулентністю та хімічними процесами в полум'ї моделюються за допомогою Eddy-Dissipation. Ця модель дозволяє наближено симулювати мікро-факельний турбулентний процес горіння попередньо неперемішаної суміші, що відбувається у пальниках СНС.

Емісія NO<sub>x</sub> розраховувались за допомогою використання стандартної моделі термічного утворення NO<sub>x</sub>. Утворення термічних оксидів азоту визначається набором хімічних реакцій, які залежать від температури і відомі як розширений механізм Зельдовича. Основні реакції, що керують утворенням термічних NO<sub>x</sub>:



Виходячи з рівнянь (1) перші два рівняння – основні реакції, які регулюють утворення теплового NO<sub>x</sub> з молекулярного азоту. Третя реакція сприяє утворенню теплового NO<sub>x</sub>, особливо за умов, близь-

ких до стехіометричних, і в паливозбагачених сумішах. З підвищенням температури кінетична енергія реагуючих молекул збільшується, що призводить до підвищення швидкості реакції. Зокрема, швидкість утворення термічних NO<sub>x</sub> подвоюється при кожному збільшенні температури на 90 К вище 2200 К. Це експоненційне співвідношення характерне для багатьох хімічних реакцій, як описано рівнянням Арреніуса, де швидкість реакції експоненційно зростає з підвищенням температури [6].

В якості типу граничних умов на вході для повітря і палива, була обрана масова витрата (mass-flow-inlet), а на виході для продуктів згорання – тиск (pressure-outlet). Теплообмін з навколишнім середовищем не враховувався. Візуалізація була створена за допомогою інструменту для обробки результатів ANSYS-Fluent countours.

Для спрощення обчислень в якості палива обрано двокомпонентну суміш метану та вуглекислого газу.

В роботі проведено оцінку впливу складу пальної суміші на робочий процес горіння в СНС. Проведено чисельний розрахунок спочатку для чистого метану, а потім для сумішей в яких до CH<sub>4</sub> додається CO<sub>2</sub> (вміст CH<sub>4</sub> не змінюється). Об'ємний вміст CO<sub>2</sub>: 10%, 20%, 30%. Суміш з вмістом 30% можна розглядати як спалювання біогазу [2].

В табл. 1 наведені дані стосовно: пальної суміші, її витрати, а також долі кожного компоненту, теплотворна здатність сумішей еквівалентна.

На рис. 3 показано розподіл температур в СНС для різного вмісту діоксиду вуглецю в суміші з метаном і для чистого метану. Коефіцієнт надлишку повітря α=1,1, визначається за формулою:

$$\alpha = \frac{V_{\text{п}}}{V_o \cdot V_r}, \quad (2)$$

де V<sub>п</sub> – витрата повітря м<sup>3</sup>/с, V<sub>г</sub> – витрата газу м<sup>3</sup>/с, V<sub>о</sub> – стехіометричний коефіцієнт повітря під час спалювання газу визначається за формулою:

$$V_o = \frac{1}{21} [0,5H_2 + 0,5CO + 2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6,5C_4H_{10} + 3C_2H_4 + 4,5C_3H_6 + 6C_4H_6 - O_2] \quad (3)$$

Таблиця 1

Масова витрата пальної суміші, та доля кожного компоненту в ній

Суміш	Компоненти	Витрата, кг/с	Об'ємна доля компоненту	Масова доля компоненту
1. CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>	0.0023739	1	1
2. CH <sub>4</sub> +CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	0.0030974	0,9	0.7663981
	CO <sub>2</sub>		0,1	0.2336019
3. CH <sub>4</sub> +CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	0.0040019	0,8	0.5931863
	CO <sub>2</sub>		0,2	0.4068137
4. CH <sub>4</sub> +CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	0,0051647	0,7	0.4596272
	CO <sub>2</sub>		0,3	0.5403728

Характеристики газового колектору:  $s/d=3,5$ ,  $d=3,0$  мм, де  $d$  – діаметр газорозподільчих отворів,  $s$  – крок, згідно рекомендацій [7].

$\text{CO}_2$  розбавляє паливно-повітряну суміш і знижує максимальну температуру в гарячих точках, де відбувається найінтенсивніше горіння, і водночас підвищує температуру в холодніших зонах, які зазвичай не досягають високих температур при горінні чистого метану. Також підвищується щільність палива, знижується довжина факелу. В усіх випадках горіння розпочинається безпосередньо в нішевій порожнині,

що забезпечує стабілізацію факелу незалежно від складу суміші. Також забезпечує стабілізацію і виступає в ролі турбулізатора струменевий «екран» палива. При додаванні діоксиду вуглецю спостерігається зміщення горіння в над нішеву зону.

При вмісті  $\text{CO}_2$  30% спостерігається погіршення сумішоутворення, модель горіння не стабільна, можливе затухання. Тобто не змінюючи геометрію забезпечити стабільне спалювання не вдається. При подальшому збільшенні його вмісту ситуація підсилюється.

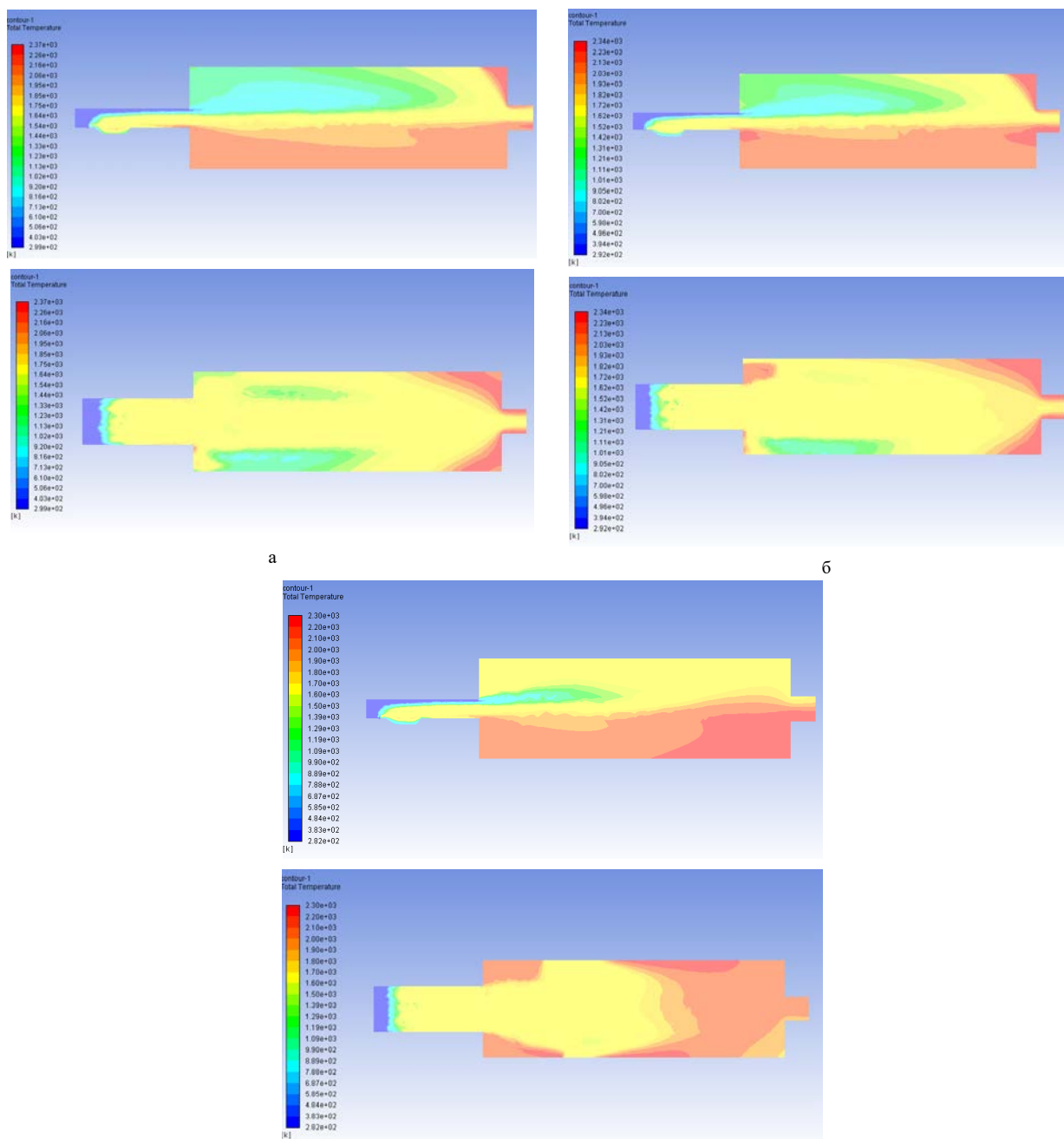


Рис. 3. Порівняння температурного поля продуктів згорання у вертикальному і горизонтальному осьових перетинах, для співвідношення компонентів за об'ємом метан/ $\text{CO}_2$  а) 100/0%, б) 90%/10%, в) 80%/20%

На рис. 4 показано, зміну максимальної концентрації  $\text{NO}_x$  з додаванням  $\text{CO}_2$ . Згідно з [8], додавання  $\text{CO}_2$  до метану термічно пригнічує пікові концентрації атомів  $\text{O}$  і радикалу  $\text{OH}$  в результаті зниження максимальної температури горіння. Це сприяє зниженню  $\text{NO}_x$ , що підтверджується результатами розрахунків (табл. 2). Значення концентрації розраховується за формулою:

$$NO_{ppm} = \frac{NO_{mole\ fraction} \times 10^6}{1 - H_2O_{mole\ fraction}} \quad (4)$$

При додаванні 10%  $\text{CO}_2$  викиди  $\text{NO}_x$  знизилися до 26%, а при 20% – до 34%. Результати також показали, що при подальшому збільшенні вмісту  $\text{CO}_2$ , продовжується зниження концентрації  $\text{NO}_x$ , хоча і не так інтенсивно, як при початковому додаванні.

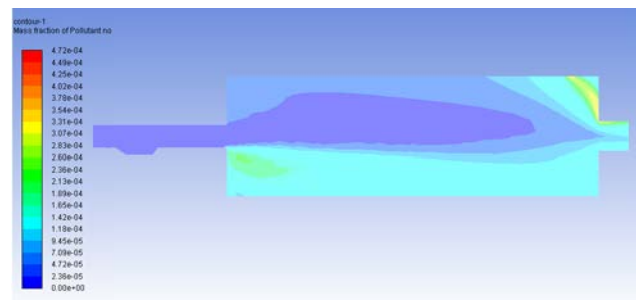
Таблиця 2  
Залежність концентрації у вихідному патрубку від об'ємної долі  $\text{CO}_2$

Об'ємна доля $\text{CO}_2$ , 20%	Значення концентрації у вихідному патрубку, ppm
0	123,7
10	89,1

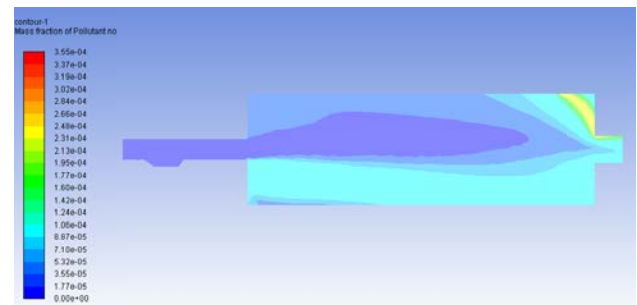
Також варто згадати факт збільшення концентрації  $\text{CO}_2$  на виході пропорційно до збільшення його концентрації на вході. Враховуючи всі позитивні та негативні фактори, можна стверджувати, що існує певний діапазон вмісту  $\text{CO}_2$ , при якому суттєво знижується  $\text{NO}_x$ , спостерігається невелике зниження температури та збільшення викидів  $\text{CO}_2$ . Цей діапазон становить 10–20%.

Щоб спалювати чистий біогаз, для досягнення близької теплової потужності як для природного газу, використовувати пальниковий пристрій розроблений для другого не можна, оскільки потрібно подати більшу кількість біогазу за масою ніж природного газу. Це неможливо без значного збільшення тиску перед пальником. Збільшення швидкості витікання пального порушить оптимальне співвідношення швидкостей газ-повітря. Це змінить глибину проникнення струменів палива в потік повітря, що призведе до порушення режиму роботи пальникового пристрою і збільшить ймовірність зриву факела. Необхідно змінити геометрію пальника, а саме збільшити діаметр отворів для проходження біогазу.

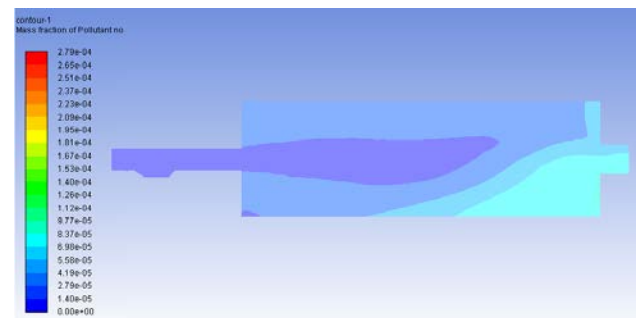
Важливо правильно вибрати відносний крок розташування газорозподільчих отворів ( $S/d$ ). Згідно [7], для природного газу рекомендовані значення становлять 3,0...4,0. Відхилення за ці межі може значно погіршити процеси сумішотворення в зоні стабілізації факела, що звужує



a



б



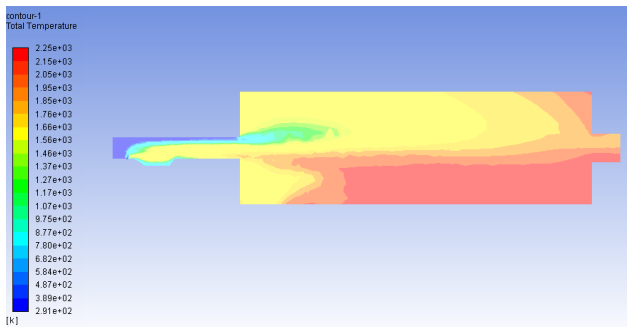
в

Рис. 4. Поле концентрації оксидів азоту в центральному перетині дослідної ділянки співвідношення компонентів за об'ємом метан/ $\text{CO}_2$  а) 100/0%, б) 90%/10%, в) 80%/20%

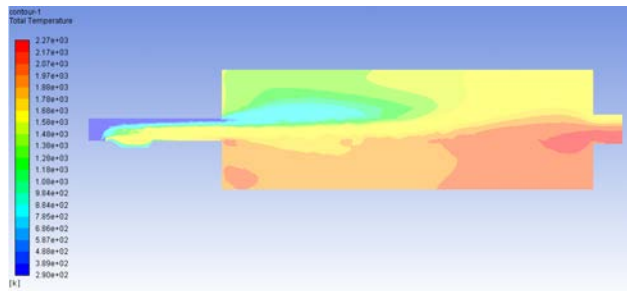
діапазон стабільного горіння. Для менш калорійних газів також бажано дотримуватися цих меж, оскільки це забезпечує стабілізацію горіння і стехіометричну суміш в зоні його стабілізації. Було проведено розрахунки для відношень:  $S/d = 3$  при  $d = 5,0$ ,  $S/d = 3,2$  при  $d = 4,0$ ,  $S/d = 2,15$  при  $d = 6,0$ . З точки зору забезпечення потужності, а також стабільного горіння, найкраще себе показав варіант  $S/d = 3,2$  при  $d = 4,0$  (рис. 6).

На рис.6 можна спостерігати, що незважаючи на забезпечення витрати біогазу яка відповідає такій же кількості  $\text{CH}_4$  (див. табл. 1) як і на рис. 3 а, досягти такої ж пікової температури не вдалося. Різниця склала близько  $120^\circ\text{C}$ . Проте середній розподіл температур в досліджуваній зоні є близьким. Також спостерігається зниження викидів  $\text{NO}_x$ , близько 40% (74 ppm).

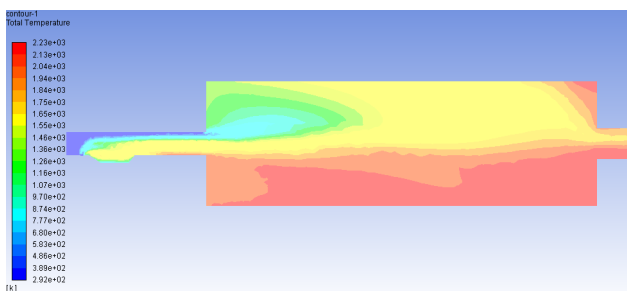




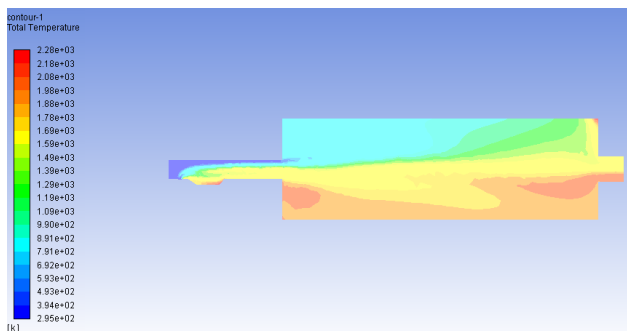
а



б



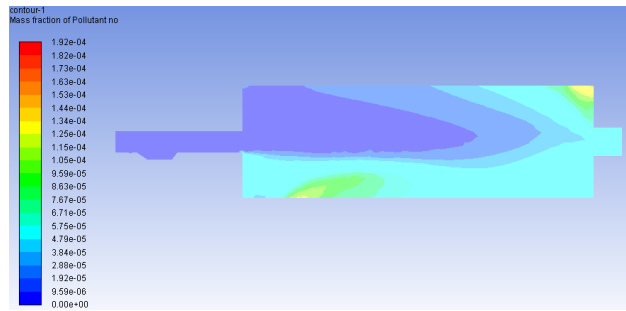
в



г

**Рис. 5. Порівняння температурного поля продуктів згоряння суміші метан/CO<sub>2</sub> зі співвідношенні компонентів за об'ємом 70%/30%, при α = 1,1, в залежності від S/d і d: а) S/d = 3,2 при d = 4, б) S/d = 2,6 при d = 4, в) S/d = 3 при d = 5, г) S/d = 2,15 при d = 6**

Збільшення далекобійності струменів палива впливає на стабілізацію та горіння факелу. Крім горіння в нішевій порожнині, воно також відбувається в області над нішею і частково продовжується далі в потоці реагуючої суміші. Дале-



**Рис. 6. Розподіл NO<sub>x</sub> по осі дослідної ділянки при спалюванні суміші метан/CO<sub>2</sub> у співвідношенні 70% на 30%, при α = 1,1 і S/d = 3,2 при d = 4**

кобійність палива визначається гідродинамічним параметром q, який є відношенням динамічних напорів палива та окисника.

$$q = (\rho_c \cdot W_c^2) / (\rho_n \cdot W_n^2), \quad (5)$$

де ρ<sub>r</sub>, ρ<sub>n</sub> – густина пального газу і повітря відповідно, W<sub>r</sub> і W<sub>n</sub> – швидкість газу і повітря.

У даній роботі для чистого метану значення гідродинамічного параметру q становить 11,877, тоді як для суміші 4 (табл. 1) при тій самій геометрії q = 23,3. При S/d = 3,2 та d = 4 значення q становить 16,3. Визначення закономірностей зміни далекобійності струменів альтернативних паливних газів є важливою практичною задачею при масштабуванні потужності стабілізаторних паливкових пристроїв.

### Висновки

– Біогаз є перспективним паливом і може повністю або частково замінювати природний газ за умови заміни або реконструкції паливкового пристрою.

– Через схильність до зриву полум'я біогаз має менший діапазон регулювання паливкового пристрою порівняно з природним газом.

– При спалюванні біогазу (суміш 4 табл. 1) викиди оксидів азоту зменшуються близько 40%, в порівнянні з природним газом. Фіксується зниження пікового значення температури (понад 120°C). Також збільшується вміст CO<sub>2</sub> в продуктах спалювання.

– Збільшення вмісту CO<sub>2</sub> в паливних газах знижує максимальні температури факелу, що призводить до уповільнення процесів горіння.

– Використання СНС розглядається перспективним з точки зору вирішення проблеми стабілізації факелу, яка виникає внаслідок того що у біогазу нижча максимальна нормальна швидкість поширення полум'я – 15–25 см/с – у порівнянні з 38 см/с при горінні природного газу.

– Збільшення вмісту діоксиду вуглецю сприяє зниженню емісії NO<sub>x</sub>: найкращий ефект спостерігається при додаванні до 20% CO<sub>2</sub>, після чого зниження від-

бувається менш інтенсивно. На кожні 10% доданого CO<sub>2</sub> зниження NO<sub>x</sub> становить приблизно 9%.

– Для забезпечення теплової потужності, близької до тієї, що досягається спалюванням чистого CH<sub>4</sub>, потрібно збільшити масову витрату біогазу більше ніж удвічі. При цьому для ефектної реалізації такої витрати необхідно також змінити геометрію пальникового пристрою. Найкращий результат показав варіант з відношенням S/d=3,2 при d=4.

– Хоча витрата біогазу на рис. 5 забезпечує ту ж витрату CH<sub>4</sub>, що і на рис. 3а, температура по всій дослідній ділянці знизилася (не більше 140°C), як і викиди NO<sub>x</sub> приблизно на 40%. Це зниження пов'язане з значною кількістю інертного компонента CO<sub>2</sub>, який розбавляє паливо та знижують пікову температуру горіння. Зменшення температури сприяє зниженню швидкості утворення NO<sub>x</sub>, оскільки цей процес сильно залежить від високих температур.

#### Список літератури:

1. B. Bharathiraja, T. Sudharsana, J. Jayamuthunagai, R. Praveenkumar, S. Chozhavendhan, J. Iyyappan, Retraction notice to “Biogas production -A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 94, October 2018, Pages 1229.
2. Л. А. Боднар, Д. І. Денесяк, К. О. Іщенко, і А. С. Лукьянец, Особливості синтезу системи виробництва і спалювання біогазу на спиртзаводі, *СучТехнБудів*, вип. 25, вип. 2, с. 145–151, Лют 2019.
3. Rawan Hakawati, Beatrice M. Smyth, Geoffrey McCullough, Fabio DeRosa, David Rooney, “What is the most energy efficient route for biogas utilization: Heat, electricity or transport?”, *Applied Energy*, Volume 206, 15 November 2017, Pages 1076–1087.
4. Antonio Mariani, Mario Minale, Andrea Unich, «Use of biogas containing CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> in controlled auto-ignition engines to reduce NO<sub>x</sub> emissions», *Fuel*, Volume 301, 1 October 2021, 120925.
5. Абдулін М. З., Сірий О.А. Дослідження сталості процесу горіння у струменево-нішевій системі спалювання палива. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2018. – Том 29 (68), № 1(2). – С. 55–60.
6. Fluent, A. N. S. Y. S. "Ansys fluent theory guide." *Ansys Inc., USA 15317* (2011): 724–746.
7. Сірий О. А. Вплив параметрів струменево-нішевої системи на робочий процес пальникових пристроїв : автореф. дис. ... канд. технн. наук. : 05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки / Олександр Анатолійович Сірий. – Київ, 2016. – 28 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/17858>
8. Jahangirian S., Engeda A., Wichman I.S. Thermal and Chemical Structure of Biogas Counterflow Diffusion Flames // *Energy and Fuels*. – 2009. – Vol. 23. – P. 5312–5321.

#### Dulskiy A.I., Siryi O.A. CFD MODELING OF THE COMBUSTION PROCESS OF METHANE-BIOGAS MIXTURE IN A JET-NICHE FLAME STABILIZER

*The use of biogas in energy production offers numerous advantages, including the ability to utilize renewable energy sources. This becomes increasingly important in the context of global efforts to reduce dependence on fossil fuels, especially against the backdrop of growing demand for energy resources. However, the high CO<sub>2</sub> content in biogas poses certain challenges for the combustion process, among which one of the most significant is the reduction in the normal flame propagation speed, which in biogas is only 15–25 cm/s, negatively affecting flame stabilization. This makes research in the field of biogas combustion promising, as it contributes to the development of technologies that can ensure more efficient use of this type of fuel in energy installations.*

*The article is devoted to modeling the combustion process of a methane-biogas mixture in a jet-niche combustion and stabilization system (JNS). Modern modeling software was used to create the CFD model. The article reveals the impact of JNS geometric and operational parameters on the combustion process with different methane-CO<sub>2</sub> component ratios.*

*Specifically, it was found that the addition of 30% CO<sub>2</sub> to methane significantly changes the hydrodynamic parameter  $q$ , increasing it from 11.877 to 23.3 with an unchanged stabilizer geometry. It was determined that this also leads to a decrease in peak temperature (up to 140°C), which is an important factor in reducing the emissions of harmful substances such as NO<sub>x</sub>. It was established that the reduction in NO<sub>x</sub> emissions when adding 30% CO<sub>2</sub> is approximately 40% compared to pure methane, which is a significant achievement in terms of environmental safety.*

*The article also highlights the need to increase biogas consumption to achieve thermal power equivalent to that provided by natural gas combustion, and discusses the challenges that arise from this, providing recommendations for their resolution.*

**Key words:** Biogas, methane-CO<sub>2</sub> mixture, CFD model, jet-niche system, temperature distribution.

УДК 665.73

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/03>**Ярошевич М.В.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Соломаха А.С.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ДОСЛІДЖЕННЯ КАВІТАЦІЙНОГО СОПЛА ТИПУ ТРУБКИ ВЕНТУРИ ДЛЯ ОТРИМАННЯ ВОДО-ПАЛИВНОЇ ЕМУЛЬСІЇ

Використання водо-паливної емульсії є перспективним напрямком для впровадження у секторі теплозабезпечення побутових споживачів. У статті описано технологію, можливу для впровадження в гібридних системах постачання як допоміжну або ж на заміну системам, що працюють на електроенергії. Існує багато методів приготування емульсії: механічні, хімічні, гідродинамічна, ультразвукова. Хоча в промисловості найрозповсюдженішим є механічний спосіб емульгування, саме гідродинамічна кавітація має переваги, актуальні для даного дослідження, а саме: відносно невеликі витрати на придбання та монтаж, простота конструкції, легкість використання та обслуговування. Кавітаційне сопло типу трубки Вентурі найпростіше в будові, розповсюджене та легкозамінне. У статті розглянуто основні методи отримання емульсії, наведено основні переваги використання сопла Вентурі для гідродинамічної кавітації під час емульгування рідин. Описано кавітаційний вузол експериментального стенду для визначення безрозмірного числа кавітації, яке є характеристикою якості процесу. Також наведено розрахунки для побудови кривої залежності створюваного насосом напору від витрати при різних числах кавітації, які в подальшому буде використано для підбору обладнання з оптимальними параметрами. Актуальність теми зумовлена критичною необхідністю українського енергетичного сектору в децентралізації та посиленню автономності побутових споживачів через прогнозований дефіцит генерації електричної енергії. Існує потреба в переведенні електричних систем теплопостачання на профіцитні види палива. Метою дослідження є розробка експериментального стенду та підбору характеристик процесу кавітації для отримання водо-паливних емульсій для подальшого спалювання їх у побутових водогрійних котлах малої потужності. Головними критеріями є доступність та усіх елементів обладнання та легкість монтажу та використання для широкого споживача.

**Ключові слова:** водо-паливна емульсія, кавітація, гідродинамічна кавітація, сопло Вентурі, емульгування, число кавітації, горловина, нагнітач, альтернативне паливо.

**Постановка проблеми.** Прогнози на опалювальний сезон 2024–2025 року в Україні вказують на можливий дефіцит електроенергії в 9ГВт, що безпосередньо вплине на теплопостачання побутових споживачів. З огляду на це постає питання децентралізації та автономності теплопостачання. Представлене дослідження спрямоване на розробку та впровадження нової методики виготовлення та використання водо-паливної емульсії в побутових водогрійних котлах. Розглядається можливість як впровадження технології у гібридних системах теплопостачання так і системи, що повністю працюють на водо-емульсійному паливі.

Водо-паливна емульсія має також суттєву екологічну перевагу. Більшість апаратних технологій контролю викидів та вдосконалення систем подачі палива не здатні зменшувати викиди NOx

і твердих частинок (далі ТЧ) при збереженні продуктивності агрегату, адже відомо, що зниження максимальної температури, досягнутої під час згорання, зменшує викиди NOx, але перешкоджає повному окисленню сажі, тим самим збільшуючи викиди ТЧ [2].

Використання водо-дизельної емульсії зменшує викиди NOx [3] за рахунок зниження максимальної температури факелу в камері згорання і водночас покращує змішування та розпилення завдяки явищу мікрровибуху, що знижує викиди ТЧ [2]. Також вагомою перевагою є можливість застосування технології як до вже існуючих, так і до нових котлів, це не потребує суттєвої зміни в технології виготовлення чи експлуатації обладнання.

Вивчення водо-паливних емульсій стає актуальнішим – кількість публікацій за темою за

останні 4,5 роки зросла на 30%. Це дозволяє зробити висновок, що технологія набирає популярність і дослідників по всьому світу за рахунок можливості економії викопного палива та покращення екологічної ситуації в енергетичному секторі. Для України це, в першу чергу, можливість здешевлення вже наявної системи теплопостачання а також переходу з дефіцитних енергоресурсів на профіцитне паливо [4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існує багато методів отримання водо-паливної суміші. Загалом процес відбувається з додаванням поверхнево-активних речовин та без. Функція поверхнево-активної речовини полягає у створенні суміші водоемульсійного палива, яка може залишатися стабільною протягом відносно тривалого часу. Без поверхнево-активних речовин стабільність емульсійного палива знизиться. Є кілька причин, чому не вигідно використовувати ПАР. Перша причина – ціна. Поверхнево-активні речовини переважно виробляються за кордоном, тому залежність від логістики та здорожчання емульсії протилежні цілі, поставлені в нашому дослідженні. Друга причина полягає в можливості застосування емульсії в реальному часі, тобто питання довготривалої стабільності для нас не актуальне.

У промисловості найчастіше використовують механічні диспергаційні методи. Найпростішим є механічний гомогенізатор, функціонування якого базується на ротаційному принципі. В подібних установках один з найважливіших параметрів – швидкість обертання. Проте у роботі [5] дослідники хіміко-технічної лабораторії Тулузи порівняли емульгування механічним ротаційним гомогенізатором з ультразвукового обладнання. В результаті виявили, що останній не тільки виробляв менші краплі води та забезпечував вищу стабільність емульгування, але також вимагав менше споживання енергії для приготування емульсії. Питома витрата такого палива також була меншою, викиди NOx і диму вищі, а CO нижчий. Недоліком ультразвукового методу емульгування є висока вартість обладнання та необхідність професійних навичок роботи з ним. Таке обладнання не підходить для використання у побутових цілях.

Гідродинамічна кавітація використовується рідше за акустичну. Причинами цьому є гірша контрольованість процесу, неможливість точкового впливу та застосування в специфічних умовах, як от з вмістом твердих, абразивних часток. Проте в даному дослідженні використовується саме гідродинамічна кавітація через низку особливостей, а саме:

– Енергоефективність – гідродинамічна кавітація з використанням сопла Вентурі, споживає менше енергії порівняно з ультразвуковою кавітацією

– Легкість масштабування

– Простота конструкції та технічного обслуговування

– Економічна ефективність – потребує менших вкладень на встановлення та експлуатацію

Кавітація виникає, коли реакційна суміш проходить через звукувальний пристрій, такий як трубка Вентурі або діафрагма, що називається соплом. При надходженні в звукуючий пристрій швидкість суміші збільшується, а її місцевий тиск зменшується. Якщо тиск реакційної суміші падає нижче тиску пари, утворюється велика кількість бульбашок. Потім, у міру розвитку струменя рідини, тиск знову зростає і бульбашки згортаються, за рахунок чого контактна поверхня зазнає значного збільшення. Крім того, велика кількість енергії вивільняється в невеликому об'ємі внаслідок сильного колапсу бульбашок, що, як наслідок, підвищує температуру та тиск у відповідному об'ємі.

Для конструкції гідродинамічного кавітаційного реактора важливо зафіксувати параметри, що впливають на процес. Виникнення та ступінь кавітації через пристрій прогнозується за допомогою безрозмірного числа, яке називається числом кавітації ( $C_v$ ), на яке сильно впливають характеристики кавітаційного пристрою (діафрагми та трубки вентурі), включаючи діаметр, коефіцієнт тиску та його геометрію. Він визначається як відношення різниці між тиском після кавітаційного пристрою ( $P_2$ ) і тиском пари рідини при робочій температурі ( $P_v$ ) до динамічного тиску в найвужчому місці ( $0,5 \rho v^2$ ) таким чином [6].

$$C_v = \frac{P_2 - P_v}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad (1)$$

Число кавітації дає вказівку на якість кавітації: оптимальні умови кавітації є для  $C_v < 1$ , а коли  $C_v$  вище 1, порожнини коливаються, а не згортаються. Це явище значно знижує ефективність кавітації, тому його слід уникати [7].

Конструкція сопла напряму впливає на число кавітації через зміну швидкості потоку та статичного тиску в рідині [8]. Діаметр горловини прямо пропорційно впливає на статичний тиск, а вихідний діаметр сопла навпаки. Форма сопла забезпечує плавний (сопло Вентурі) чи різкий (лавальне сопло, діафрагми) перехід тиску і швидкості, що впливає на стабільність та рівномірність потоку. Гладкість поверхні та довжина горловини впли-

вають на турбулентність потоку [9]. Зміна будь-якого з цих параметрів впливає на гідродинамічні умови всередині сопла і, відповідно, на значення числа кавітації. Оптимізація форми і розмірів сопла дозволяє контролювати процес кавітації для досягнення бажаних результатів у конкретному застосуванні.

Кожен тип сопла має свої специфічні переваги та підходить для конкретних завдань і процесів. Вибір сопла залежить від вимог процесу, таких як необхідна інтенсивність кавітації, масштаб процесу, а також фізичні та хімічні властивості оброблюваної рідини.

– Трубка Вентурі:

Це класичне сопло для гідродинамічної кавітації. Воно складається з звуження (конфузора), вузької частини (горловини) і розширення (дифузора). Коли рідина проходить через горловину, її швидкість збільшується, а тиск зменшується, що призводить до утворення кавітаційних бульбашок.

– Діафрагми:

У кавітаційному пристрої з діафрагмою рідина змушена пройти отвори, які розташовані на пластині, та мають відповідну площу поверхні отвору. Як правило, площа отвору становить близько 40–60 мм<sup>2</sup>, при цьому загальна площа поверхні пластини становить від 300 до 500 мм<sup>2</sup>.

Приклад діафрагми показаний на рис. 1. Коли рідина проходить в напрямку *a* через отвір діаметром *d*, швидкість негайно зростає в результаті зменшення площі потоку в звуженні, що призводить до явища кавітації [6]. Відповідне розташування та кількість отворів забезпечують збільшення кінетичної енергії разом із падінням тиску, а потім відповідну кавітаційну продуктивність.

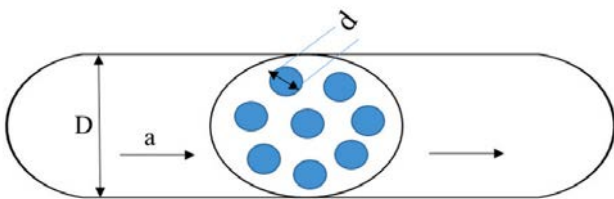


Рис. 1. Схематичне зображення діафрагми

Для створення оптимальних умов кавітації можна розглянути два підходи; по-перше, це підвищення вхідного тиску середовища, яке потребує впровадження насосів високого тиску та конструкції, здатної витримувати високий тиск. Наступним і більш простим підходом є проектування вільної площі діафрагми таким чином, щоб зменшити втрати тиску та підвищити ефективність відновлення тиску на вході за звуженням [10].

– Обертова гідродинамічна кавітація.

У цьому типі пристроїв утворення кавітаційної бульбашки відбувається завдяки відповідній конструкції ротора та швидким обертам (2200–8000 об/хв). На відміну від неротаційної гідродинамічної кавітації, у ротаційному типі кавітація генерується декількома блоками генерації кавітації, які розташовані на роторі.

Він складається з двох секцій: циліндричного ротора з деякими отворами на його поверхні і статора, який є нерухомою частиною (рис. 2).

Найважливішою частиною пристрою є циліндрична частина. Коли ротор обертається, статичний тиск рідини в отворі стає нижчим за тиск пари, і згодом виникає кавітація [11]. Оскільки ротори потребують великої потужності для руху, ці пристрої є енергоємними, що призводить до високої вартості обробки, тому їх використання в промислових масштабах є непопулярним і нерентабельним.

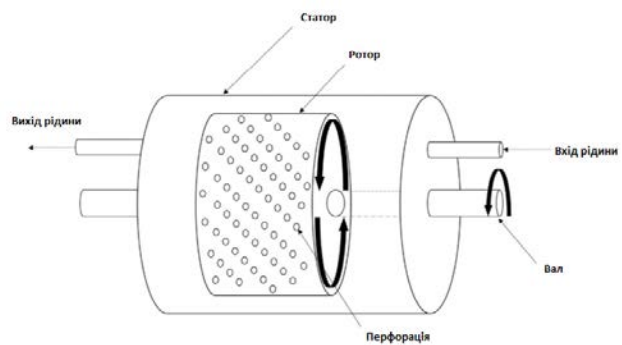


Рис. 2. Спрощена схема обертового гідродинамічного реактора

Кожен тип сопла має свої переваги і недоліки, і вибір конкретного типу залежить від конкретних завдань і умов експлуатації. У даному дослідженні було обране сопло типу трубки Вентурі через ряд переваг, серед яких відсутність рухомих частин, легкість встановлення і експлуатації, доступність побутовим споживачам, порівняно низька вартість.

Завдяки своїй простій будові трубки Вентурі були вивчені та широко використовуються в лабораторних масштабах для дослідження ефективності та механізму технології гідродинамічної кавітації. Через значне падіння тиску робочої рідини, викликане різким звуженням проточної частини, часто потрібен потужний насос, що може призвести до значних витрат.

Горловина є критичною частиною такого кавітатора. Його геометрія безпосередньо впливає як на утворення порожнин, так і на імпульс тиску, що створюється в процесі.

Було проведено багато досліджень про вплив діаметра горловини на гідродинамічну кавітацію. В [12] досліджували 2 моделі трубки Вентурі з діаметром горловини  $d = 1,4$  мм та  $d = 1,8$  мм (див. рис. 3) За однакового початкового тиску та фіксованою довжиною горловин, найвужче горло забезпечувало менше число кавітації ( $C_v = 0,29$ ), що призвело до більшої ефективності попередньої обробки порівняно з ширшим горлом ( $C_v = 0,44$ ).

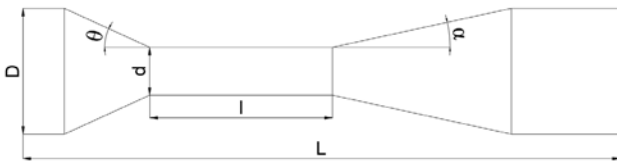


Рис. 3. Схематичне зображення сопла Вентурі

Також важливо відзначити, що зміна діаметра горловини відповідно змінює кути конвергенції (збіжності,  $\theta$ ) і дивергенції (розбіжності,  $\alpha$ ) трубки Вентурі. Кут розбіжності трубки Вентурі є важливим геометричним параметром, який впливає на її робочі характеристики. У кавітаційних соплах Вентурі швидкість відновлення тиску контролюється кутом розбіжності. Ці кути повинні коливатися від  $\alpha = 5,0^\circ$  до  $7,5^\circ$  [12] для трубки Вентурі, яка використовується в гідродинамічній кавітації, де швидкість відновлення тиску має бути сприятливою.

Встановлено, що вихідний кут трубки Вентурі є одним із основних геометричних параметрів, що впливає на робочі характеристики. Науковці інституту хімічної технології Індії [13] також провели теоретичний аналіз чотирьох трубок Вентурі з різними кутами на виході і заявили, що кути на виході секції розбіжності контролюють швидкість колапсу порожнини. Для всіх досліджених змодельованих конструкцій горловини (з вихідним кутом  $\alpha = 5,5^\circ; 6,5^\circ; 7,5^\circ; 8,5^\circ$ ) перепад тиску в системі був однаковим (7 атм), але помітна суттєва різниця в розмірах зони низького тиску та утвореній кількості парової фази. Як і очікувалося, зі збільшенням кута розбіжності падіння тиску в розбіжній секції збільшиться, що призведе до зменшення швидкості рідини в горлі, що, у свою чергу, також збільшує число кавітації. Було встановлено, що оптимальний кут розбіжності дорівнює  $5,5^\circ$ , оскільки число кавітації, отримане при  $5,5^\circ$ , було найнижчим серед цих чотирьох.

Тиск на вході має найбільший вплив на число кавітації. Було встановлено [14], що число кавітації зменшується від  $C_v = 0,76$  до  $C_v = 0,29$ , коли тиск на вході збільшується від 1 бар до 5 бар. Проте у тому самому дослідженні вказується,

що вхідний тиск від 6 бар і вище викликає явище суперкавітації, тобто утворення хмари порожнин, згортання яких послаблюється. Це, в свою чергу, знижує інтенсивність процесу.

**Постановка завдання.** Метою статті є опис методики визначення ефективності кавітаційного вузла способом розрахунку безрозмірного числа кавітації на створеному експериментальному стенді.

#### Виклад основного матеріалу.

**Методика дослідження.** В дослідженні був використаний генератор кавітації на основі трубки Вентурі, виготовлений з латуні, діаметром горловини 2,5 мм, схематичне зображення якого на рисунку 3.

Для випробування та визначення можливих чисел кавітації для обраної нами конструкції трубки Вентурі, було створено експериментальний стенд, представлений на рис. 4.

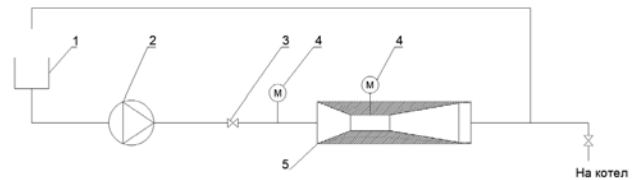


Рис. 4. Принципова схема установки з отримання емульсії методом гідродинамічної кавітації в трубці Вентурі: 1 – ємність з сумішшю води та дизеля; 2 – мембранний насос; 3 – регулюючий клапан; 4 – манометр; 5 – кавітатор

Пристрій складається з накопичувальної ємності з сумішшю води та дизеля, насоса, клапанів регулювання витрати та манометрів. Насос нагнітає тиск на вході в кавітаційний пристрій. Витрата потоку регулюється клапаном, манометри вимірюють тиск на вході в кавітатор та у найвужчому місці (горловині). Отримана емульсія за потреби проходить повторну обробку або ж надходить на котел для подальшого спалювання.



Рис. 5. Фото зібраного кавітаційного вузла з манометрами для вимірювання

За [6] кавітаційний (двофазний) потік починається при  $C_v \approx 1$ , плівковий режим зі стійким роз-

ділом кавітаційної порожнини від потоку а також суперкавітаційний відбувається при  $C_v < 1$ . Тож прийнятний для емульгування коефіцієнт має бути меншим 1, з урахуванням цього факту можна визначити залежність необхідного перепаду тиску, створюваного насосом на вході в кавітаційний вузол від витрати суміші. Проведемо розрахунок для водопровідної води кімнатної температури. Швидкість  $v$  течії рідини в найвужчому місці кавітатора:

$$v = \frac{Q}{S} \quad (2)$$

де  $Q$  – витрата рідини, л/с  
 $S$  – переріз труби, м<sup>2</sup>

Підставимо даний вираз у формулу 1, отримаємо

$$C_v = \frac{2(P_2 - P_v)}{\rho \left(\frac{Q}{S}\right)^2} \quad (3)$$

Переріз горловини трубки Вентурі з відомим діаметром  $d$  визначається як

$$S = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (4)$$

тож (3) приймає наступний вигляд

$$C_v = \frac{(P_2 - P_v) \pi^2 d^4}{8\rho Q^2} \quad (5)$$

Прийmemo  $C_v$ , мінімальне необхідне значення для початку двухфазної кавітації 0,9. Густина води за кімнатної температури 20°C за [16]  $\rho = 998,2$  кг/м<sup>3</sup>

Тоді

$$Q^2 \cdot 0,9 \cdot 8 \cdot 998,2 = \delta P \cdot 3,14^2 \cdot (2,5 \cdot 10^{-3})^4 \quad (6)$$

$$\delta P = \frac{Q^2}{5,36 \cdot 10^{-14}} \quad (7)$$

Беручи до уваги розмірності, переводимо  $\delta P$  в атм,  $Q$  в л/хв, залежність набуває вигляду

$$\delta P = 3,1 \cdot Q^2 \quad (8)$$

Аналогічно виведемо формули для значень числа кавітації 0,5 та 0,3.

$$\delta P_{0,5} = 1,725 \cdot Q_{0,5}^2 \quad (9)$$

$$\delta P_{0,3} = 1,036 \cdot Q_{0,3}^2 \quad (10)$$

Дані, отримані при розрахунку відображені на графіку на рисунку 6.

З графіку очевидно, що при  $C_v < 1$  можна отримати більшу швидкість змішування при менших затратах на нагнітання необхідного напору.

Також слід звернути увагу на те, що з використанням суміші води та палива зміниться густина робочого тіла, але характер залежності збережеться. Це дасть можливість підібрати потрібне

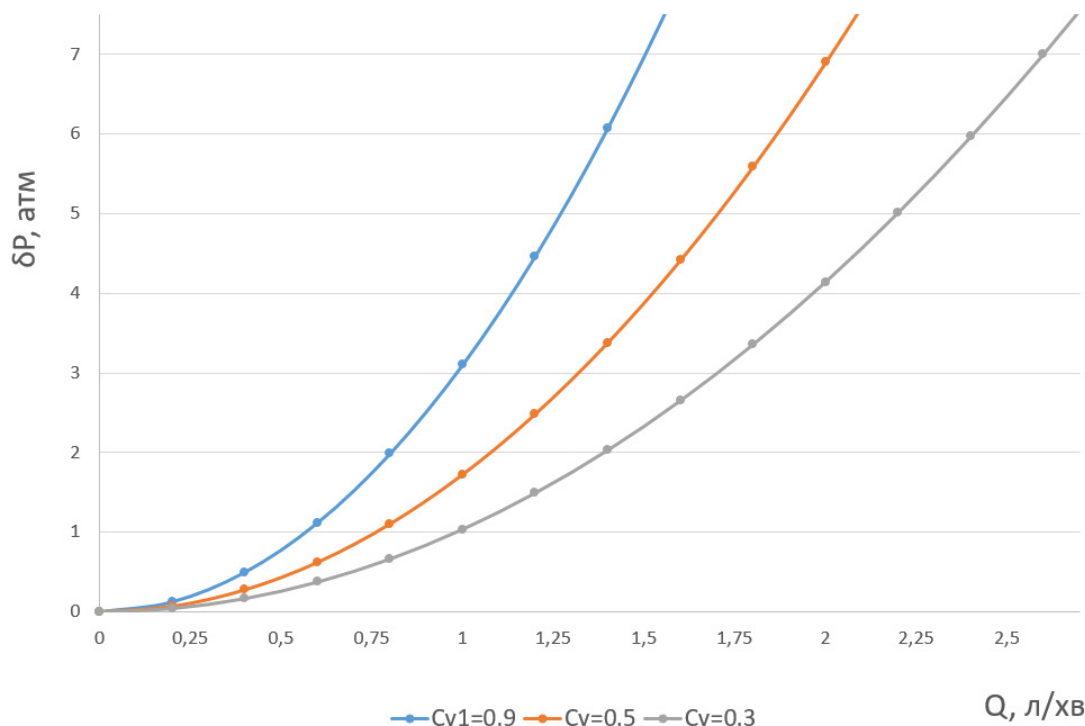


Рис. 6. Діаграма залежності різниці тисків, створеної насосом від витрати при різних числах кавітації

обладнання для дослідження та отримання оптимальних результатів з огляду на техніко-економічну складову.

**Висновки.** В роботі виконано аналіз наявних літературних джерел щодо використання гідродинамічної кавітації для приготування водопаливної емульсії, а також обґрунтовано вибір сопла типу трубки Вентурі для подальшого вивчення та

застосування в установці для спалювання даної емульсії. Підтримання режиму кавітації з числом  $C_v$  сильно менше за 1 дає можливість використовувати насос з більш плавною кривою продуктивності та знижує капіталоемність установки.

В наступних публікаціях буде наведено результати експериментального дослідження на виготовленому соплі.

#### Список літератури:

1. Шинкарик М.М., Кравець О.І. Основи теплотехніки: навч. посібник. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2024. 132 с.
2. Мельник В. О. (2020). Аналіз складу та дисперсності паливних емульсій. Нафтогазова енергетика, (1(33)), 124–131.
3. El Shenawy, E. A., et al. Investigation and performance analysis of water-diesel emulsion for improvement of performance and emission characteristics of partially premixed charge compression ignition (PPCCI) diesel engines. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2019, 36: 100546.
4. Українське Радіо. Сьогодні. Зранку «Сергій Куюн про диверсифікацію ринку пального». <https://ukr.radio/news.html?newsID=104389>. 27.05.2024
5. Abismail B, Canselier JP, Wilhelm AM, Delmas H, Gourdon C. Emulsification by ultrasound: drop size distribution and stability. Ultrason Sonochem 1999;6:75–83.
6. R. Teran ´ Hilaes, L. Ramos, S.S. da Silva, G. Dragone, S.I. Mussatto, J.C.D. Santos, Hydrodynamic cavitation as a strategy to enhance the efficiency of lignocellulosic biomass pretreatment, Crit. Rev. Biotechnol. 38 (2018) 483–493, <https://doi.org/10.1080/07388551.2017.1369932>.
7. P.R. Gogate, A.B. Pandit, Engineering design methods for cavitation reactors II: Hydrodynamic cavitation, AIChE J. 46 (2000) 1641–1649, <https://doi.org/10.1002/aic.690460815>.
8. P.R. Gogate, I.Z. Shirgaonkar, M. Sivakumar, P. Senthilkumar, N.P. Vichare, A. B. Pandit, Cavitation reactors: Efficiency assessment using a model reaction, AIChE J. 47 (2001) 2526–2538, <https://doi.org/10.1002/aic.690471115>
9. Liu X, Wu Z, Li B, Zhao J, He J, Li W, et al. Influence of inlet pressure on cavitation characteristics in regulating valve. Eng Appl Comput Fluid Mech 2020;14(1):299–310.
10. M. Gałol, A. Przyjazny, G. Boczkaj, Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes based on cavitation – a review, Chem. Eng. J. 338 (2018) 599–627, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.049>.
11. Y.M. Oo, A. Legwiryakul, J. Thawornprasert, K. Somnuk, Production of diesel–biodiesel–water fuel nanoemulsions using three-dimensional printed rotor–stator hydrodynamic cavitation, Fuel 317 (2022), 123445, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123445>.
12. Saharan, V.K., 2016. Computational study of different venturi and orifice type hydrodynamic cavitating devices. Journal of Hydrodynamics 28, 293–305.
13. Bashir TA, Soni AG, Mahulkar AV, Pandit AB. The CFD driven optimisation of a modified venturi for cavitation activity. Can J Chem Eng 2011;89(6): 1366–75.
14. Hongbo Shi, Ruban A., Timoshchenko S., Nikrityuk P., Numerical Investigation of the Behavior of an Oil–Water Mixture in a Venturi Tube. Energy & Fuels 2020 34 (11), 15061-15067. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.0c02129
15. A Heat Transfer Textbook / by John H. Lienhard, V, and John H. Lienhard, IV, Cambridge, Massachusetts : Phlogiston Press, 2024.

#### **Yaroshevych M.V., Solomakha A.S. STUDY OF THE VENTURI CAVITATION NOZZLE FOR OBTAINING A WATER-FUEL EMULSION**

*The use of water-fuel emulsion is a promising direction for implementation in the sector of heating for domestic consumers. The article describes a technology that can be implemented in hybrid supply systems as a supplement or replacement for systems that work on electricity. There are many methods of emulsion preparation: mechanical, chemical, hydrodynamic, ultrasonic. Although the mechanical method of emulsification is the most common in industry, it is hydrodynamic cavitation that has the advantages relevant to this study, namely: relatively low acquisition and installation costs, simplicity of construction, ease of use and maintenance. The cavitation nozzle of the Venturi tube type is the simplest in construction, widespread and easily replaceable. The article discusses the main methods of obtaining an emulsion, the main advantages of using a Venturi*



---

*nozzle for hydrodynamic cavitation during emulsification of liquids are given. The cavitation unit of the experimental stand for determining the dimensionless number of cavitation, which is a characteristic of the quality of the process, is described. Calculations are also given for constructing a curve of the dependence of the pressure created by the pump on the flow rate at different cavitation numbers, which will be used in the future to select equipment with optimal parameters. The topicality of the topic is due to the critical need of the Ukrainian energy sector to decentralize and strengthen the autonomy of household consumers due to the projected shortage of electricity generation. There is a need to transfer electric heat supply systems to surplus types of fuel. The purpose of the research is the development of an experimental stand and selection of the characteristics of the cavitation process for obtaining water-fuel emulsions for their further combustion in domestic water-heating boilers of small capacity. The main criteria are the availability of all equipment elements and ease of installation and use for the general consumer.*

**Key words:** *water-fuel emulsion, cavitation, hydrodynamic cavitation, Venturi nozzle, emulsification, cavitation number, nozzle, supercharger, alternative fuel.*

## ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 620.3: 66.061.34 + 543.9

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/04>

### **Воробйова В.І.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### **Скиба М.І.**

Український державний університет науки і технологій

### **Лінючева О.В.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### **Васильєв Г.С.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### **Віннічук К.В.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## **ОЦІНКА ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ІОННИХ РІДИН НА ОСНОВІ ХОЛІН ХЛОРИДУ, БЕТАЇНУ ТА ПРОЛІНУ ДЛЯ СТВОРЕННЯ МАТРИЧНИХ ЕЛЕКТРОЛІТІВ ДЛЯ СЕНСОРНИХ СИСТЕМ**

У статті досліджено електрохімічні властивості іонних рідин на основі холін хлориду, бетаїну та проліну з метою їх використання для створення матричних електролітів, або інших сферах хімічних технологій. У роботі проведено порівняльний аналіз електропровідності НЕР III типу з введенням 50 % води. Результати досліджень демонструють, що комбінації холін хлориду, бетаїну та проліну як акцепторів водневого зв'язку з різними донорами водневого зв'язку (сечовина, молочна кислота, ксилітом, гліцерил, 1,2-пропандіол) можуть бути ефективно використані для розробки стабільних та ефективних НЕР, які можна використати як електроліти для сенсорних пристроїв. Варіація донора та акцептора при синтезі НЕР суттєво впливає на електропровідність отриманих розчинників. Електропровідність НЕР зменшується у порядку використаної основи розчинника: холін хлорид > бетаїн > пролін. Найбільше збільшення електропровідності при введенні води спостерігається у НЕР-2 (Бетаїн-Сечовина) (0 % – 0,742 См/м та 50 % – 7,316 См/м), а найменше – у НЕР-1 (Холін Хлорид-Сечовина) (без змін при 50 % води 0,009 См/м). Це по'язно із тим, що бетаїн є більш полярною молекулою, яка може ефективніше взаємодіяти з водою завдяки своїй здатності утворювати сильні водневі зв'язки. ода сприяє збільшенню рухливості іонів в розчині, що призводить до значного зростання електропровідності. ода сприяє збільшенню рухливості іонів в розчині, що призводить до значного зростання електропровідності. Холін хлорид, на відміну від бетаїну, менш активно взаємодіє з водою. Крім того, холін хлорид має стабільні асоціації між іонами холіну і хлоридом, які менш схильні до дисоціації при додаванні води. В результаті навіть при 50 % води система залишається відносно стабільною, з меншою кількістю вільних іонів, що обмежує збільшення електропровідності. Для інших двох систем на основі холін хлориду (холін хлорид-сечовина) та бетаїну (бетаїн-ксилітол) визначено вікно електрохімічної стабільності при введенні води. При додаванні від 1 до 10 % води к НЕР-2 (холін хлорид-сечовина), вікно електрохімічної стабільності залишається відносно незмінним.

**Ключові слова:** низькотемпературні евтектичні розчинники, електропровідність, холін хлорид, бетаїн, пролін, електрохімічна стабільність, молекулярна структура, розчинники.

**Постановка проблеми.** Значний інтерес у якості зеленої альтернативи традиційним органічним розчинникам становлять такі класи, як «водні системи розчинників», «іонні рідини (IP)», «низькотемпературні евтектичні розчинники (НЕР)». Вони привертають підвищену увагу дослідників з початку 2000х, після дослідження Аббота та колег [1], які відзначили аномально глибоке зниження температури плавлення в евтектичному складі певних донорів і акцепторів водневих зв'язків. На початку 2000х у літературі терміни НЕР та IP використовувались як синоніми, хоча необхідно зазначити, що це насправді два різних типи розчинників. НЕР – це системи, утворені з евтектичної суміші кислот Льюїса або Бренстеда та основ, які можуть містити різні аніонні та/або катіонні сполуки; навпаки, IP утворюються із систем, що складаються переважно з одного типу дискретних аніонів і катіонів [2]. Хоча фізичні властивості НЕР подібні до інших IP, їхні хімічні властивості пропонують сфери застосування, які значно відрізняються. Сучасна тенденція [3] направлена на відмову від використання звичайних розчинників та іонних рідин (IP) на користь розчинників на біологічній основі, низькотемпературних евтектичних розчинників (НЕР).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найцікавішим для хімічної технології та інженерії є НЕР III типу, які зазвичай містять комбінацію холіну хлориду, бетаїну або проліну та донорів водневого зв'язку, такі як спирти, аміди, поліоли та карбонові кислоти [1, 4]. Ці рідини прості в приготуванні, також більшість з них підлягають біологічному розкладу і являються відносно недорогими. Широкий діапазон доступних донорів водневих зв'язків означає, що цей клас НЕР особливо легко піддається адаптації. Варіювання сполуками, що використані як донори водневого зв'язку, суттєвим чином впливає на фізико-хімічні властивості – в'язкість, терміна стабільність, густина та електропровідність.

**Постановка завдання.** Великий перелік сполук, що може бути використаний як донори водневого зв'язку значно може скорегувати їх властивості, зокрема електрохімічні [5]. Електропровідність НЕР є важливим параметром у багатьох галузях хімічної технології, а особливо при створенні електрохімічних сенсорних систем. Слід зазначити, що НЕР мають достатньо високу іонну провідність, що робить їх перспективними розчинниками для створення на їх основі або з їх використанням низькотемпературних електролітів, які здатні забезпечити ефективну передачу заряду в сенсорних системах, тим самим покращуючи їх

чутливість та швидкість відгуку. НЕР здатні розчиняти широкий спектр органічних і неорганічних речовин, що дозволяє використовувати їх у поєднанні з різними матеріалами для створення гібридних електролітів для електрохімічних сенсорів. Таким чином, електропровідність НЕР є одним з перших та ключових параметрів для ефективності їх використання в цьому напрямку.

Тому метою роботи було вивчення впливу типу донорів та акцепторів водневого зв'язку на електрохімічні властивості НЕР III типу. Вивчення впливу вмісту води на електропровідність розчинників.

#### Виклад основного матеріалу.

##### Методика експериментальних досліджень

У таблиці 1 представлені складові для формування НЕР. Компоненти зважували у молярному співвідношенні 1:2 та змішували у мірній ємності, при кімнатній температурі після чого витримували при легкому підігріві (близько 60–80°C) до формування рідини. Після отримання рідкої суміші її охолоджують до кімнатної температури, де вона зберігає свою рідку форму.

Для оцінки електропровідності НЕР використовувався метод електрохімічного імпедансу. Два платинових електроди розміром 1 см<sup>2</sup> кожен міцно був закріплені на відстані одного сантиметра один від одного і розміщені в скляний стакан об'ємом 40 см<sup>3</sup>, який містив 20 см<sup>3</sup> досліджуваного НЕР. Між електродами подавали електричний сигнал з діапазоном частот 1–100 кГц. Для досліджень був використаний потенціостат Versa STAT 3 Potentiostat Galvanostat (AMETEK Scientific Instruments, США).

Отримані експериментальні результати.

Електропровідність НЕР, зокрема на основі бетаїну, холін хлориду або проліну залежить від донора водневого зв'язку через специфічні взаємодії між молекулами акцептора та донора водневого зв'язку (рисунк 1–3).

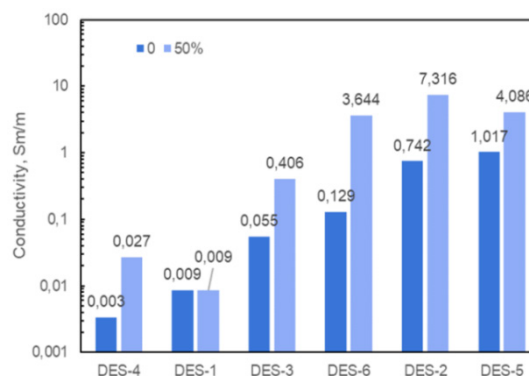


Рис. 1. Вплив вмісту води на електропровідність НЕР

Електропровідність НЕР на основі бетаїну, холін хлориду та проліну була досліджена та виявлена залежність між складом сумішей і їхньою провідністю.

Якщо розглядати систему НЕР де як донор акцептор водневого зв'язку використовувати бетаїн, то досить високу електропровідність мають системи Бетаїн-Сечовина (НЕР-1) і Бетаїн-Молочна кислота (НЕР-3).

Інші НЕР демонструють низьку провідність через те, що гліцерин, 1,2-пропандіол і Ксилітол є неіонними молекулами (рис. 3 а). Ймовірно, у цих НЕР без додавання води (рис. 3 а) відсутні дисоційовані іони. Оцінено вплив додавання води на електропровідність НЕР на основі бетаїну. При додаванні в ці системи до 50 % води (рис. 3 б) їх електропровідність зростає. Електропровідність НЕР-1 і НЕР-3 зросла до 0,0870 і 0,4160 См/м

Таблиця 1

Системи НЕР

Абревіатура	Акцептор водневого зв'язку	Структурна формула	Донор водневого зв'язку	Структурна формула	Співвідношення сполук
НЕР-1	Бетаїн	<chem>CN(C)CC(=O)O</chem>	Сечовина	<chem>NC(=O)N</chem>	1:2
НЕР-2	Холін Хлорид	<chem>CN(C)CC(=O)[O-]</chem>	Сечовина	<chem>NC(=O)N</chem>	1:2
НЕР-3	Бетаїн	<chem>CN(C)CC(=O)O</chem>	Молочна кислота	<chem>CC(O)C(=O)O</chem>	1:2
НЕР-4	Пролін	<chem>C1CCNC1C(=O)O</chem>	Ксилітол	<chem>OC(CO)C(O)CO</chem>	1:1
НЕР-5	Холін хлорид	<chem>CN(C)CC(=O)[O-]</chem>	Пролін	<chem>C1CCNC1C(=O)O</chem>	1:1
НЕР-6	Холін хлорид	<chem>CN(C)CC(=O)[O-]</chem>	Ксилітол	<chem>OC(CO)C(O)CO</chem>	1:2
НЕР-7	Бетаїн	<chem>CN(C)CC(=O)O</chem>	Гліцерол	<chem>OC(CO)CO</chem>	1:2
НЕР-8	Бетаїн	<chem>CN(C)CC(=O)O</chem>	1,2-пропандіол	<chem>OC(CO)CO</chem>	1:2
НЕР-9	Бетаїн	<chem>CN(C)CC(=O)O</chem>	Ксилітоол	<chem>OC(CO)C(O)CO</chem>	1:2

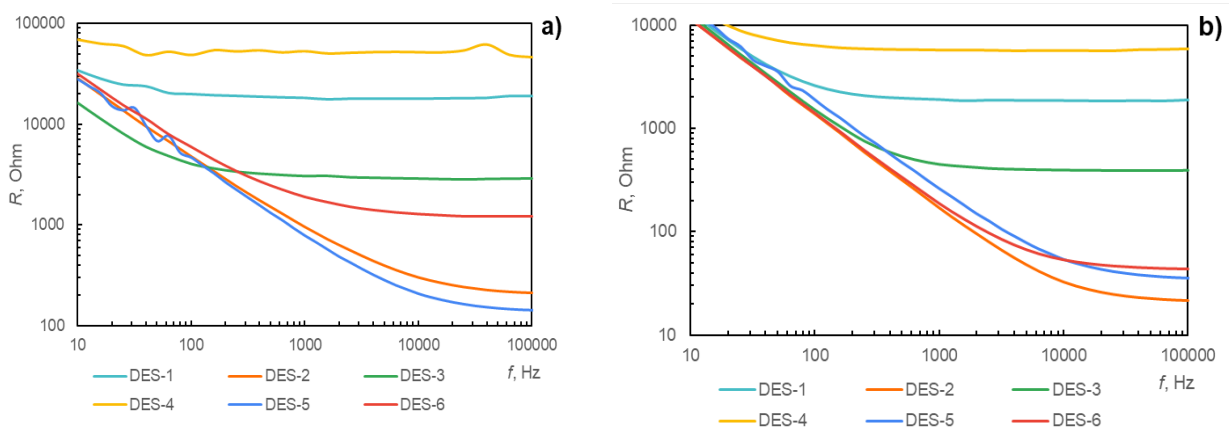


Рис. 2. Електропровідність НЕР (а) та вплив вмісту води на електричний опір НЕР (б)

відповідно (рис 2 б). Електропровідність НЕР, Бетаїн-Молочна кислота, відрізняється від електропровідності Бетаїн-Гліцерин або Бетаїн-Ксилітол через іонну природу компонентів (рис 3 а). Гліцерин, 1,2-пропандіол і ксилітол не утворюють іони у розчині, оскільки вони є нейтральними молекулами. У цих системах немає вільних іонів, які можуть переміщатися під дією електричного поля, що знижує електропровідність (рис. 3 б). Хоча ці молекули здатні утворювати водневі зв'язки з бетаїном, ці зв'язки не призводять до генерації іонів, які могли б переносити заряд. Натомість, вони утворюють стабільні асоціати, які не сприяють іонній провідності. Неіонні молекули, такі як гліцерин або пропандіол, мають більші розміри та вищу в'язкість, що обмежує рухливість молекул у системі. Це ще більше зменшує здатність системи проводити електричний струм. Молочна кислота може частково дисоціювати на іони лактату ( $C_3H_5O_3^-$ ) та іони водню ( $H^+$ ) у розчині при додаванні води. Системи НЕР на основі Холін хлориду, а саме Холін хлорид-Пролін (1.017 См/м) і Холін хлорид-Сечовина (0.742 См/м) мали найвищу провідність серед інших НЕР на основі бетаїну та проліну, а НЕР Пролін-Ксилітол (0.003 См/м) мав найнижче значення електропровідності. Якщо проаналізувати вклад акцептора водневого зв'язку то провідність НЕР зменшується в такій послідовності: НЕР на основі – Холін Хлориду > Бетаїну > Проліну. Таку закономірність можна пояснити тим, що Холін хлорид це іонна сполука, де хлоридний аніон забезпечує високу концентрацію заряджених частинок (іонів) у розчині, що сприяє більшій електропровідності. Його іонна природа дозволяє формувати сильні водневі зв'язки з донорами водневих зв'язків, забезпечуючи активний перенос заряду в системі. Хоча це бетаїн, який має заряджену струк-

туру (звітер-іон), він не настільки ефективний в генерації іонів у розчині, як холін хлорид. Це знижує концентрацію вільних іонів, що впливає на електропровідність. В свою чергу Пролін це амінокислота, яка не є іонною сполукою в нейтральному середовищі. Хоча пролін і може утворювати водневі зв'язки, він не генерує багато вільних іонів у розчині, що робить його менш ефективним у забезпеченні електропровідності. Якщо проаналізувати вклад донора водневого зв'язку, то електропровідність досліджуваних НЕР-5 і НЕР-6 була вищою, ніж у інших НЕР на основі Бетаїну-Молочної кислоти та Бетаїну-Ксилітолу. Системи, що містять Сечовину займають проміжне місце по електропровідності в системах на основі Холін хлориду, Бетаїну та Проліну. Таким чином можна зробити висновок, що більше значення на електропровідність має акцептор водневого зв'язку, а ніж донор і це пов'язано зі структурою сполуки. Холін хлорид має компакту структуру з чітким розподілом заряду, що сприяє високій провідності. Бетаїн має більш стабільну структуру зі звітер-іонною природою, де зарядові центри нейтралізують один одного, що знижує кількість рухомих іонів. Пролін, будучи амінокислотою з циклічною структурою, має меншу здатність до розпаду на вільні іони у порівнянні з холін хлоридом або бетаїном, що додатково знижує його провідність. Також у холін хлориді іони мають високу рухливість, що полегшує перенос заряду. У бетаїні рухливість іонів знижується через стабілізацію внутрішньомолекулярними водневими зв'язками. У проліні, через його менш виражену іонну природу та циклічну структуру, рухливість заряджених частинок найменша. При дослідженні впливу води на електропровідність НЕР зафіксовано, що НЕР-1 і НЕР-2 мають найнижчий опір серед усіх систем у широкому діапазоні частот

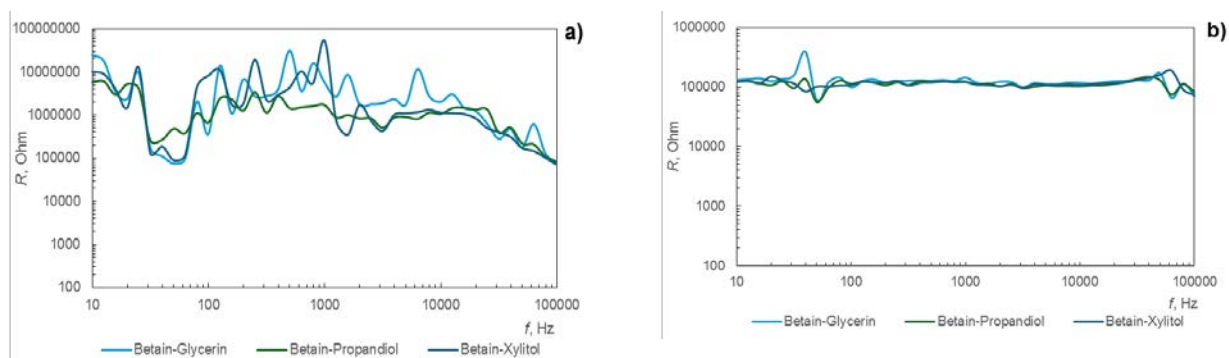


Рис. 3. Вплив вмісту води на електричний опір НЕР на сонові бетаїну

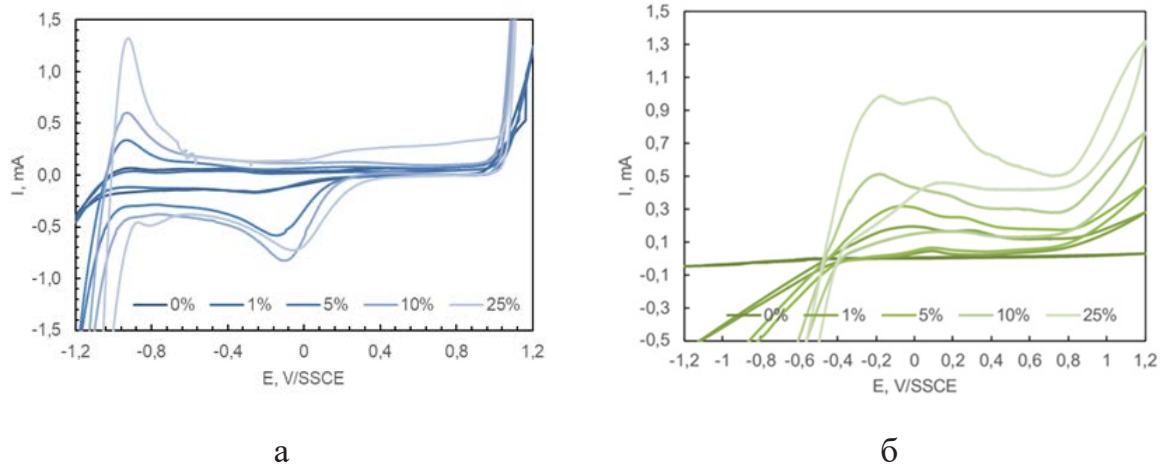


Рис. 4. Вплив вмісту води на вікно електрохімічної стабільності НЕР:  
а – Холін Хлорид-Сечовина; б – Бетаїн-Молочна кислота

при додаванні 50 % води. Це свідчить про їхню вищу електропровідність порівняно з іншими системами. НЕР-3 і НЕР-5 демонструють середній рівень опору, вищий, ніж НЕР-1 і НЕР-2, але нижчий, ніж НЕР-4. Так, НЕР-6 має трохи кращу провідність, ніж НЕР-4, але відрізняється незначно. Для всіх систем спостерігається класична тенденція: зі збільшенням частоти опір зменшується. Для НЕР-2 та НЕР-3 визначено вікно електрохімічної стабільності при додаванні води (рис. 4). Можна побачити, що для НЕР Бетаїн-Молочна кислота при збільшенні вмісту води від 0 % до 25 %, електрохімічна активність і стабільність системи змінюються. Для зразка НЕР з 0% води (низька концентрація), електрохімічне вікно починається з -1.2 В і закінчується приблизно на 0.9 В. При додаванні 1 %, 5 %, і 10 % до НЕР, це вікно залишається відносно незмінним, але з деякими відмінностями в амплітуді піків. Найбільші зміни спостерігаються при 25 % концентрації води, де спостерігається більше зростання струму на позитивних потенціалах, що свідчить про зменшення стабільності та появу нових електрохімічних процесів.

При підвищенні вмісту води в НЕР (до 25 %) помітно підвищується амплітуда струму на позитивних потенціалах, що вказує на те, що відбуваються більш інтенсивні електрохімічні процеси, ймовірно, пов'язані з окисленням компонентів систем. Для НЕР Холін-хлорид-Сечовина при відсутності води спостерігається стабільне електрохімічне вікно приблизно від -1.2 В до 1.0 В. Це вказує на відсутність значних електрохімічних реакцій у цьому діапазоні. При додаванні 1 %, 5 %, 10 %, і 25 %, межі електрохімічного вікна суттєво не змінюються, але збільшується величина струму на краях вікна, особливо на позитивних потенці-

алах. При збільшенні концентрації води до 25 %, помітно підвищується амплітуда струму, зокрема на позитивних потенціалах (близько 1.0 В), що свідчить про активніші електрохімічні процеси або реакції. У негативній області потенціалів (близько -1.2 В) також спостерігається збільшення негативного струму зі збільшенням концентрації, що вказує на активніші відновні процеси.

**Висновки.** Встановлено зменшення електропровідності в системах НЕР від холін хлориду до бетаїну і проліну. НЕР-1 (Бетаїн-Сечовина) і НЕР-2 (Холін Хлорид-Сечовина) є більш перспективними для створення матричних електролітів для сенсорних систем. НЕР-4 і НЕР-6 мають найнижчу провідність у всьому діапазоні частот. Холін хлорид є найбільш іонною і рухливою сполукою серед них, тоді як пролін має найменшу схильність до іонізації та забезпечує найменшу провідність. Вплив донора у НЕР на електропровідність більш чітко прослідковується в рамках одного виду НЕР. Встановлено, що низька електропровідність НЕР на основі бетаїну та гліцерину, 1,2-пропандіолу і ксилітолу обумовлена їх неіонною природою та обмеженим механізмом переносу заряду в системі. На відміну від них, сечовина та молочна кислота можуть утворювати певні іонні структури чи асоціації, що підвищує їхню провідність і системи НЕР із їхнім вмістом в інших системах НЕР на основі холін хлориду-сечовина також демонструє достоя провідність. Для НЕР (Бетаїн-Молочна кислота) система залишається стабільнішою в широкому діапазоні потенціалів. Однак із збільшенням концентрації до 25 %, стабільність системи зменшується, що видно з підвищення струму на позитивних потенціалах (біля 0.9–1.2 В), що може бути результатом електрохімічної деградації або розкладу компонентів системи. Для НЕР холін хлорид-Сечовина

без додавання води або при низькій концентрації (1 %) електрохімічне вікно залишається широким і стабільним. Однак, із збільшенням вмісту води до 25 %, підвищується як позитивний, так і негативний струм, що вказує на зниження стабільності системи і збільшення кількості електрохімічних реакцій при крайніх значеннях потенціалу.

Отже, іонні рідини на основі цих сполук можуть бути перспективними матеріалами для використання як електроліти в різних типах сен-

сорних систем, і як один з перспективних НЕР доцільно використати систему Холін Хлорид-Сечовина.

**Фінансування.** Дослідження виконані в рамках конкурсу НФДУ «Наука для зміцнення обороноздатності України». Тема. Інноваційні методики та засоби швидкого визначення забруднюючих речовин на основі сполук гідразину, що потрапляють в навколишнє середовище внаслідок воєнних дій та аварійного розливу ракетних/авіаційних палив.

#### Список літератури:

1. Abbott, A. P., Boothby, D., Capper, G., Davies, D. L., & Rasheed, R. K. Deep eutectic solvents formed between choline chloride and carboxylic acids: versatile alternatives to ionic liquids. *Journal of the American Chemical Society*, 2004. 126 (29), 9142-9147.
2. Christopher M.A. Brett, Perspectives for the use of deep eutectic solvents in the preparation of electrochemical sensors and biosensors, *Current Opinion in Electrochemistry*, 2024. 45, 101465. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2024.101465> Vorobyova, V., Skiba, M. &
3. Vasylyev, G. Extraction of phenolic compounds from tomato pomace using choline chloride-based deep eutectic solvents. *Food Measure.*, 2022. 16, pp. 1087-1104. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01238-5>
4. Jian Wang, Chengmiao Ma, Zhixu Zhang, Xinyi Ge, Qingguo Zhang, Ying Wei, Thermodynamic properties, electrochemical properties, and interaction behaviors of quaternary ammonium salts-based deep eutectic solvents, *Journal of Molecular Liquids*, 2024. 408, 125384. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125384>.
5. Akshay Sharma, Renuka Sharma, Ramesh C. Thakur, Lakhveer Singh, An overview of deep eutectic solvents: Alternative for organic electrolytes, aqueous systems & ionic liquids for electrochemical energy storage, *Journal of Energy Chemistry*, 2023. 82, 592-626, <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.03.039>.

#### **Vorobjova V.I., Skiba M.I., Linyucheva O.V., Vasilyev G.S., Vinnichuk K.V. EVALUATION OF THE ELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF IONIC LIQUIDS BASED ON CHOLINE CHLORIDE, BETAINE, AND PROLINE FOR THE CREATION OF MATRIX ELECTROLYTES FOR SENSOR SYSTEMS**

*The article examines the electrochemical properties of ionic liquids based on choline chloride, betaine, and proline with the aim of using them to create matrix electrolytes or other areas of chemical technology. In the paper, a comparative analysis of the electrical conductivity of DES type III with the introduction of 50% water was carried out. Research results demonstrate that combinations of choline chloride, betaine and proline as hydrogen bond acceptors with various hydrogen bond donors (urea, lactic acid, xylitol, glyceryl, 1,2-propanediol) can be effectively used to develop stable and effective DESs that can be used as electrolytes for sensor devices. The variation of the donor and acceptor in the synthesis of DES significantly affects the electrical conductivity of the obtained solvents. The electrical conductivity of DES decreases in the order of the solvent base used: choline chloride > betaine > proline. The greatest increase in electrical conductivity when water is introduced is observed in DES-2 (Betaine-Urea) (0% – 0.742 S/m and 50% – 7.316 S/m), and the smallest – in DES-1 (Choline Chloride-Urea) (no changes at 50% water 0.009 Sm/m). This is due to the fact that betaine is a more polar molecule that can interact more effectively with water due to its ability to form strong hydrogen bonds. ode helps to increase the mobility of ions in the solution, which leads to a significant increase in electrical conductivity. ode helps to increase the mobility of ions in the solution, which leads to a significant increase in electrical conductivity. Choline chloride, unlike betaine, interacts less actively with water. In addition, choline chloride has stable associations between choline and chloride ions that are less prone to dissociation when water is added. As a result, even with 50% water, the system remains relatively stable, with fewer free ions, which limits the increase in electrical conductivity. For the other two systems based on choline chloride (choline chloride-urea) and betaine (betaine-xylitol), a window of electrochemical stability with the introduction of water was determined. When 1 to 10% water is added to DES-2 (choline chloride-urea), the window of electrochemical stability remains relatively unchanged.*

**Key words:** low-temperature eutectic solvents, electrical conductivity, choline chloride, betaine, proline, electrochemical stability, molecular structure, solvents.

**Концевой А.Л.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Орестова М.В.**

ТОВ «Фарма Старт»

**Концевой С.А.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ТЕРМОДИНАМІЧНІ І МАТЕРІАЛЬНІ РОЗРАХУНКИ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ

Стаття присвячена перспективному методу отримання синтез-газу для виробництва хімічних продуктів. Для опису різноманітних методів газифікації використано математичну модель, що ґрунтується на трьох реакціях:  $2\text{CO} \leftrightarrow \text{C} + \text{CO}_2$ ;  $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{C} + 2\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4$ . Вирішено систему трьох нелінійних рівнянь на основі виразів констант рівноваги цих реакцій, значень вихідних концентраційних параметрів, тиску і температури газифікації. Рішення системи в пакеті MathCAD надає значення рівноважного ступеня перетворення для вище наведених реакцій, що дозволяє визначити рівноважний склад генераторного газу. Наведено результати розрахунку рівноважних концентрацій компонентів генераторного газу для вугілля різної якості. Визначено показники недопалу для ідеального (чистий карбон) і реального (природного) вугілля за температури  $900^\circ\text{C}$ , встановлено суттєву різницю об'єму і складу генераторного газу. На відміну від відомого алгебраїчного методу Дешаліта, запропонована математична модель здатна визначати витратні коефіцієнти по вугіллю і дуттю для реального (високо зольного і низько зольного) вугілля. З'ясовано залежність рівноважного складу компонентів і недопалу від температури, тиску і складу дуття. Знайдено температуру повної газифікації вугілля (відсутність недопалу), яка залежить від тиску і складу дуття. Доведено, що підвищення температури збільшує вихід цільових продуктів і зменшує недопал вугілля, але при досягненні певної температури ( $900\text{--}1000^\circ\text{C}$ ) вплив температури стає несуттєвим. Встановлено, що при підвищенні тиску вихід цільових компонентів водню і оксиду карбону (II) зменшується, а кількість недопалу зростає внаслідок перебігу реакції  $\text{CO}_2 + \text{C} \leftrightarrow 2\text{CO}$  у зворотному напрямку; збільшення співвідношення  $\text{H}_2\text{O}:\text{O}_2$  призводить до зменшення вмісту оксиду карбону (II) та збільшення вмісту водню, що полегшить подальшу корекцію складу газу на синтез метанолу. Визначено суттєву розбіжність рівноважного складу генераторного газу з практичними даними, при цьому найбільш сильно відрізняється вміст  $\text{CO}_2$ . Це можна пояснити тим, що для забезпечення автотермічності процесу подають надлишкове вугілля на спалювання до  $\text{CO}_2$ .

**Ключові слова:** газифікація вугілля, термодинаміка, математична модель, рівноважний склад, матеріальний баланс.

**Постановка проблеми.** Сучасні технології виробництва аміаку і метанолу базуються на використанні природного газу, запаси якого не безкінечні. Геологічні запаси вугілля складають 90–97% від загальних ресурсів горючих копалин Землі. Отже, актуальною задачею є переробка твердого палива у карбону (II) оксид та водень шляхом його газифікації. При цьому склад газів, що отримують, можна варіювати в широких межах.

Газифікація різних сортів твердого палива має певні переваги, а саме:

а) газифікації піддають торф і буре вугілля, кам'яне вугілля і антрацит незалежно від їх хімічного складу (зольна частина, домішки сірки, вологість тощо);

б) методами газифікації отримують горючі гази (чистий водень, оксид вуглецю (II), їх суміші), придатні для синтезу аміаку, метанолу, оксо-синтезу. Генераторний газ також можна використовувати для енергетичних установок;

в) газогенераторні установки можна використовувати на великих хімічних заводах, ТЕЦ і на невеликих енергетичних та хімічних установках.



Отже, синтез-газ, отриманий у результаті газифікації, згодом використовується для виробництва електроенергії або цінного хімічного синтезу. Відмітимо екологічну складову газифікації: після очищення від сполук сірки (а це набагато дешевше сіркоочищення викидних газів на ТЕС), при спалюванні генераторного газу отримують значно менше шкідливих викидів, ніж при прямому спалюванні звичайного палива.

Актуальність проблеми підкреслено на засіданні НАН України 29 жовтня 2014 року, на якому йшлося про перспективи реалізації міжнародного інвестиційного проекту «Високотехнологічний комплекс виробництва моторного палива з вугілля», який передбачає створення в Україні промислового виробництва синтетичного моторного палива із синтез-газу за методом Фішера-Тропша. При цьому синтез-газ отримують у процесі паро-кисневої газифікації кам'яного вугілля як вітчизняного видобутку, так і імпортованого.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Процес газифікації відомий здавна і до кінця 50-х років ХХ сторіччя був основним для отримання синтез-газу. В останні десятиріччя проблемам газифікації приділяється виняткова увага у всьому світі. Огляд сучасного стану речей надано в роботі [1], в якій критично розглядається успіхи газифікації, ключові технології газифікаторів та вплив властивостей твердого палива (тобто вугілля, біомаси, деревини) на продуктивність газифікації. Пропонується спільна газифікація вугілля, біомаси та твердих відходів разом із частковим використанням  $\text{CO}_2$  як реагенту. Крім того, щоб зробити його промислово життєздатним, необхідний технологічний прорив у вловлюванні та поглинанні вуглецю. Розроблено [2] метод розрахунку процесу газифікації низькосортного палива на прикладі деревини (сосна), який дає змогу провести розрахунок параметрів робочого процесу в газифікаторі з суцільним шаром, який є найбільш технологічно та конструктивно простим. На основі експериментальних досліджень складено матеріальний і тепловий баланси процесу газифікації деревини. У статті [3] надано тризонну (реакції піролізу, окиснення та відновлення) кінетичну модель для термодинамічного аналізу газифікації двох видів твердого палива (каучукової деревини та відпрацьованого палива) шляхом оптимізації хімічної кінетики для п'яти реакцій у зоні відновлення. За допомогою кінетичної моделі визначається склад і температури синтез-газу для реакцій піролізу, окиснення та відновлення. Автори [4] відмічають, що в світі досить успішно працюють установки газифікації:

в потоці – по методу Texaco, Shell, Prenflo, Destec, АBB CE; в киплячому шарі – по методу Вінклера, U-gas, KRW, Westinghouse Corporation; в нерухомому щільному шарі – по методу British Gas/Lurgi. Найбільш перспективними серед наведених вважаються методи газифікації в киплячому шарі та потоці. Автором [5] використано алгебраїчний метод Дешаліта для оцінки складу генераторного газу. Метод дає змогу розрахунковим шляхом отримувати концентраційні оцінки складу продуктів газифікації залежно від складу дуття, температури та тиску в газогенераторі. Сутність метода Дешаліта (Харків, 1959 р.) наведена у Довіднику азотчика за 1967 р. і передбачає рішення системи шести рівнянь методом послідовних наближень. Цей метод не визначає показники матеріального балансу, а саме об'єм отриманого генераторного газу, наявність недопалу вугілля або його нестачу за конкретних технологічних умов. Нами розроблено метод альтернативного розрахунку рівноважного складу газу і матеріального балансу з врахуванням кількості та складу вугілля, яке піддається безперервній паро-киснево-повітряній газифікації [6]. З багатьох реакцій, що описують процес газифікації, вибрано лише три, що достатньо повно описують різноманітні методи газифікації:  $2\text{CO} \leftrightarrow \text{C} + \text{CO}_2$ ;  $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{C} + 2\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4$ . Алгоритм розрахунків, зокрема рішення системи трьох нелінійних рівнянь, реалізовано нами у математичному пакеті MathCAD. Надано розрахунки для ідеального вугілля, яке на 100% складається з карбону.

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження впливу складу реального (низько зольного і високо зольного) вугілля, тиску, температури і складу дуття на вихід генераторного газу і концентрацію його компонентів.

**Виклад основного матеріалу.** Як було зазначено вище, за нашою методикою [6] розраховано рівноважний склад і матеріальний баланс для паро-киснево-повітряній газифікації ідеального вугілля (100% карбону) і результати надано у таблиці 1. З врахуванням складу реального високо зольного вугілля (С – 57,6%; Н – 3,1%; S – 0,3%; N – 0,5%; O – 4,7%; зольність Z – 25,8%; волога W – 8%) за тих самих параметрів в рамках нового дослідження виконано подібні розрахунки і результати наведено у таблиці 2.

Звісно, що об'єм генераторного газу зменшився, а його склад збагатився на водень і метан завдяки присутності водню у вихідному вугіллі.

Особливістю запропонованої математичної моделі є можливість складання матеріального балансу, при цьому розраховується необхідна кіль-

кість дуття певного складу на задану масу вугілля – стовпчик 2; кількість вихідного газу для подальших розрахунків, що утворюється згідно реакцій:



– стовпчик 3; кількість і склад отриманого генераторного газу – стовпчики 4–6. Внаслідок можливого перебігу реакції  $CO_2 + C \leftrightarrow 2CO$  в зворотному напрямку, що проявляється особливо при низьких температурах, в стовпчику 4 надано масу вуглецю, що не прореагував.

Для оцінки впливу параметрів процесу на рівноважний вихід цільових компонентів генераторного газу ( $H_2$  та  $CO$ ) зроблено ряд розрахунків, при цьому задано склад реального високо золь-

ного та низько зольного вугілля. Результати цих розрахунків для паро-кисневої газифікації наведено на рисунках 1–3. Використано технічний кисень з домішками азоту (3%).

З наведених даних можна зробити наступні висновки:

– підвищення температури збільшує вихід цільових продуктів, але при досягненні певної температури (900–1000°C) вплив температури стає несуттєвим (значення виходу змінюється дуже мало). Використання температури, вище за 1000°C у деяких процесах газифікації обумовлено необхідністю отримання шлаку (золи) у рідкому стані;

– підвищення температури зменшує кількість недопалу;

Таблиця 1

**Результати розрахунків рівноважного складу генераторного газу, отриманого з ідеального вугілля**

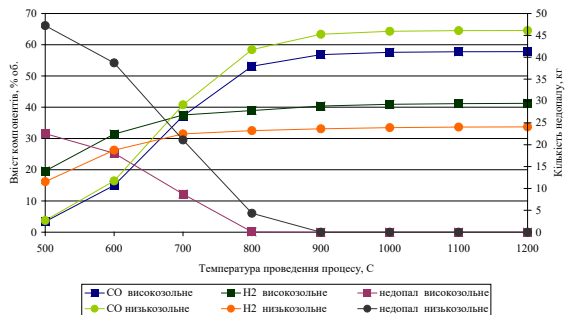
Температура 900°C, тиск 20 атм., об'ємне співвідношення в дутті: $N_2 : O_2 = 1$ ; $H_2O : O_2 = 1$						
Компонент	Прихід, кг	Вихідний газ, кг	Витрата в стані рівноваги, кг	Рівноважний об'єм, м <sup>3</sup>	Рівноважний склад, % об.	Довідкові данні, % об.
Вугілля	100,00		19,20			
Пар	50,00					
O <sub>2</sub> (збагачене повітря)	88,89					
N <sub>2</sub> (збагачене повітря)	77,78					
CO <sub>2</sub>		0,00	52,65	26,804	9,98	11,05
CO		233,33	150,78	120,624	44,93	43,10
H <sub>2</sub>		5,56	3,84	43,001	16,02	16,10
CH <sub>4</sub>		0,00	2,42	3,393	1,26	1,04
N <sub>2</sub>		77,78	77,78	62,222	23,18	23,42
H <sub>2</sub> O		0,00	9,99	12,435	4,63	5,29
Всього	316,67	316,67	316,67	268,479	100,00	100,00

Таблиця 2

**Результати розрахунків рівноважного складу генераторного газу, отриманого з реального вугілля**

Температура 900°C, тиск 20 атм., об'ємне співвідношення в дутті: $N_2 : O_2 = 1$ ; $H_2O : O_2 = 1$					
Компонент	Прихід, кг	Вихідна суміш, кг	Витрата в стані рівноваги, кг	Рівноважний об'єм, м <sup>3</sup>	Рівноважний склад, % об.
Вугілля, в т.ч.:	100				
Вуглець	57,6		5,629		
Зола	25,8	25,8	25,8		
Пара	28,8				
O <sub>2</sub> (збагачене повітря)	46,5				
N <sub>2</sub> (збагачене повітря)	40,688				
CO <sub>2</sub>		0	28,254	14,384	7,33
CO		134,4	94,46	75,568	38,48
H <sub>2</sub>		6,281	4,736	53,046	27,01
CH <sub>4</sub>		0	5,043	7,06	3,6
N <sub>2</sub>		41,188	41,188	32,95	16,78
H <sub>2</sub> O		8	10,558	13,139	6,69
H <sub>2</sub> S		0,319	0,319	0,21	0,11
Всього	215,988	215,988	215,988	196,358	100

Склад низько зольного вугілля, %		Склад високо зольного вугілля, %	
Вуглець	83,5	Вуглець	57,6
Водень	2,4	Водень	3,1
Сірка	2,2	Сірка	0,3
Азот	1	Азот	0,5
Кисень	0,9	Кисень	4,7
Зола	4,8	Зола	25,8
Волога	5,2	Волога	8



Тиск 0,1 МПа (1 атм), об'ємне співвідношення в дутті:  $N_2/O_2 = 0,031$ ;  $H_2O/O_2 = 1$

**Рис. 1.** Залежність виходу цільових компонентів генераторного газу від температури для паро-кисневої газифікації

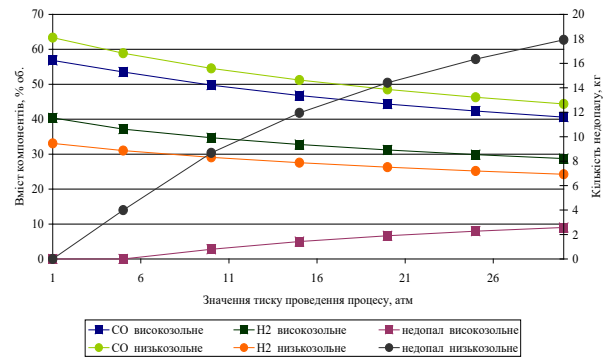
– при підвищенні тиску вихід цільових компонентів зменшується, а кількість недопалу зростає внаслідок перебігу реакції  $CO_2 + C \leftrightarrow 2CO$  у зворотному напрямку;

– збільшення співвідношення  $H_2O:O_2$  призводить до зменшення вмісту  $CO$  та збільшення вмісту  $H_2$ , що полегшує подальшу корекцію складу газу на органічний синтез, зокрема для синтезу метанолу.

При порівнянні розрахованого рівноважного складу генераторного газу з практичними даними [7, 8] отриманими при газифікації вугілля в промисловості або в лабораторних умовах, можна зробити висновок, що найбільш сильно відрізняється вміст  $CO_2$ . Це можна пояснити тим, що для забезпечення автотермічності процесу подають надлишкове вугілля на спалювання до  $CO_2$ . Кількість додаткового вугілля на підтримку високої температури визначають з теплового балансу, що виходить за рамки цієї статті.

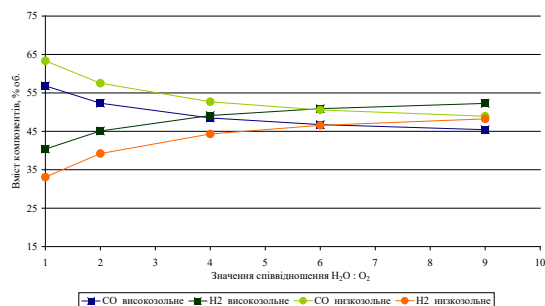
#### Список літератури:

1. M. Shahabuddin, Tanvir Alam. Gasification of Solid Fuels (Coal, Biomass and MSW): Overview, Challenges and Mitigation Strategies. *Energies* 2022, 15(12), 4444; <https://doi.org/10.3390/en15124444>
2. С. С. Лис, М. М. Семерак, О. Г. Юрасова. Розроблення методу розрахунку процесу газифікації низькосортного палива у суцільному шарі на основі експериментальних досліджень. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2019, т. 29, № 1. С. 87-92.
3. Rupesh Palange, Cataldo De Blasio, Murugesan Krishnan. Energy and exergy analysis of gasification of solid fuels by optimization of chemical kinetics. *Energy*. Volume 285, 15 December 2023, 129487 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544223028815>
4. О.А. Негода, В.В. Собченко, О.Г. Орайло. Газифікація в вихрових апаратах як перспективний напрямок розвитку газогенераторних технологій. *Східно-Європейський журнал передових технологій* 2/8 (62) 2013. С. 17-19.



Температура 900 °C; об'ємне співвідношення в дутті:  $N_2/O_2 = 0,031$ ;  $H_2O/O_2 = 1$

**Рис. 2.** Залежність виходу цільових компонентів генераторного газу від тиску для паро-кисневої газифікації



Температура 900°C; тиск 0,1 МПа (1 атм), об'ємне співвідношення в дутті:  $N_2/O_2 = 0,031$

**Рис. 3.** Залежність виходу цільових компонентів генераторного газу від співвідношення  $H_2O : O_2$  для паро-кисневої газифікації

Розроблений алгоритм термодинамічного і матеріального розрахунків може бути задіяний для будь-якого твердого палива.

**Висновки.** Отримані результати підтверджують можливість використання алгоритму і розробленої програми в середовищі MathCAD для розрахунку рівноважного складу генераторного газу, отриманого газифікацією вугілля паро-киснево-повітряним дуттям. Вивчено вплив температури, тиску і складу дуття на вміст компонентів генераторного газу і показники матеріального балансу. Багатоваріантні розрахунки визначають температуру початку повного перетворення вугілля для різних видів дуття.

5. Гулей О.Б. Вибір оптимального вугілля українського видобутку для парокисневої газифікації в стаціонарному шарі. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки Том 31 (70) № 4 2020. С. 141-148. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/20>

6. Концевой А.Л., Концевой С.А., Васенко Л.В. Метод розрахунку рівноважного складу генераторного газу одержаного при газифікації вугілля. Вопросы химии и химической технологии, т. 4 (108), 2016, с.51-55

7. Орлова В.М. Інтенсифікація процесу газифікації малометаморфізованого вугілля України з використанням металургійних шлаків : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.17.07 – «Хімічна технологія палива і пально-мастильних матеріалів» / Орлова Вікторія Миколаївна; Український державний науково-дослідний вуглехімічний інститут УХІН. – Харків, 2005. – 19 с. <http://search.nbuv.gov.ua/publ/REF-0000273300>

8. Thermodynamic Analysis of Coal to Synthetic Natural Gas Process. Lei Chen, Rane Nolan, Shakeel Avadhany, 2009, – 28 p. [https://www.researchgate.net/publication/228441605\\_Thermodynamic\\_Analysis\\_of\\_Coal\\_to\\_Synthetic\\_Natural\\_Gas\\_Process](https://www.researchgate.net/publication/228441605_Thermodynamic_Analysis_of_Coal_to_Synthetic_Natural_Gas_Process)

### **Kontsevoy A.L., Orestova M.V., Kontsevoi S.A. THERMODYNAMIC AND MATERIAL CALCULATIONS OF COAL GASIFICATION**

*The article is devoted to a promising method of obtaining synthesis gas for the production of chemical products. A mathematical model based on three reactions was used to describe various gasification methods:  $2CO \leftrightarrow C + CO_2$ ;  $CO_2 + H_2 \leftrightarrow CO + H_2O$ ;  $C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$ . A system of three nonlinear equations was solved based on the expressions of the equilibrium constants of these reactions, the values of the initial concentration parameters, pressure and temperature of gasification. The solution of the system in the MathCAD package provides the value of the equilibrium degree of conversion for the above reactions, which allows you to determine the equilibrium composition of the generator gas. The results of calculating the equilibrium concentrations of generator gas components for coal of different quality are given. Underburn indicators were determined for ideal (pure carbon) and real (natural) coal at a temperature of 900°C, and a significant difference in the volume and composition of the generator gas was established. Unlike the well-known Deshalit algebraic method, the proposed mathematical model is able to determine the gasification process cost factors for real (high-ash and low-ash) coal. The dependence of the equilibrium composition of the components and underfire on temperature, pressure, and the composition of the blast was determined. The temperature of complete gasification of coal (absence of underburning) was found, which depends on the pressure and composition of the blast. It has been proven that increasing the temperature increases the output of the target products and reduces coal underburning, but when a certain temperature (900–1000°C) is reached, the effect of temperature becomes insignificant. It was established that with increasing pressure, the output of the target components of hydrogen and carbon monoxide (II) decreases, and the amount of underfire increases due to the course of the reaction  $CO_2 + C \leftrightarrow 2CO$  in the reverse direction; an increase in the  $H_2O:O_2$  ratio leads to a decrease in the content of carbon monoxide (II) and an increase in the content of hydrogen, which will facilitate further correction of the gas composition for methanol synthesis. A significant discrepancy between the equilibrium composition of the generator gas and the practical data was determined, while the  $CO_2$  content differed the most. This can be explained by the fact that to ensure the autothermality of the process, excess coal is supplied for burning to  $CO_2$ .*

**Key words:** coal gasification, mathematical model, thermodynamics, equilibrium composition, material balance.

**Майзеліс А.О.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

## КАТАЛІТИЧНА АКТИВНІСТЬ СКЛАДОВИХ ШАРІВ МУЛЬТИШАРОВИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ СПЛАВІВ NI-ZN-CU У РЕАКЦІЇ ВИДІЛЕННЯ КИСНЮ

В роботі показано, що одним з найважливіших напрямків розвитку каталізаторів реакції виділення кисню для різних пристроїв зберігання та перетворення енергії є розробка економічно ефективних та високопродуктивних електрокаталізаторів на основі сплавів, гідроксидів і оксидів нікелю. Стаття присвячена оцінці доцільності застосування мультишарових покриттів, в яких періодично чергуються нано- та субмікророзмірні шари сплавів Ni-Zn-Cu і сумішей цих металів з гідроксидами, в реакції виділення кисню в лужному електролізі. Розглянуто електрохімічні закономірності осадження і розчинення одношарових і бішарових тонких плівок сплавів Ni-Zn-Cu, що є складовими мультишарових покриттів, в аміакатно-гліцинатних розчинах, та визначено їх ефективність в процесі виділення кисню в лужному розчині. Використано методи циклічної вольтамперометрії (ЦВА), анодної стріпінг-вольтамперометрії та лінійної вольтамперометрії за допомогою потенціостату MTech SPG-500L. З'ясовано, що при збільшенні поляризації осадження шарів сплавів зменшується внесок збагачених цинком і міддю фаз в склад плівок і збільшується частка фаз, збагачених нікелем. Показано, що значення струмів обміну для сплавів вищі за значення струму обміну реакції виділення кисню на нікелі. Визначено, що одношарове покриття, яке позначене як «-1,15» і яке осаджують при потенціалі -1,15В, бішарові покриття «-1,15/-1,3» і «-1,3/-1,15», які осаджують двоімпульсним методом при відповідних потенціалах, та покриття «-1,15/1,3-EO» і «-1,3/-1,15-EO», які додатково електрохімічно обробляють з метою знецинкування, за зменшенням перенапруги виділення кисню по відношенню до виділення кисню на нікелевій плівці, при густині струму 10 мА/см<sup>2</sup> розташовуються в ряд «-1,15/-1,3» (-66 мВ) < «-1,3/-1,15» (-80 мВ) < «-1,15» (100 мВ) < «-1,3/-1,15-EO» (-114 мВ) < «-1,15/1,3-EO» (-116 мВ), а при густині струму 230 мА/см<sup>2</sup> цей ряд має вигляд «-1,15» (-127 мВ) < «-1,3/-1,15» (-177 мВ) < «-1,15/1,3-EO» (-246 мВ) < «-1,15/-1,3» (-249 мВ) < «-1,3/-1,15-EO» (-290 мВ).

**Ключові слова:** сплав Ni-Zn-Cu, виділення кисню, мультишарове покриття, оксогідроксиди, струм обміну.

**Постановка проблеми.** Сплави на основі нікелю широко застосовуються як каталізатори різних процесів, серед яких окислення молекул води до молекул кисню відіграє важливу роль. Електрохімія кисню має велике значення для різних пристроїв зберігання та перетворення енергії. Реакція виділення кисню (РВК) є ключовою реакцією, що використовується в електролізерах води (при виробництві зеленого водню) і метал-повітряних батареях, що перезаряджаються.

Еталонними каталізаторами РВК визнані оксиди іридію та рутенію. Проте їхня висока ціна та обмежені ресурси перешкоджають застосуванню у великих масштабах. Для вирішення цих проблем велика увага приділяється розробці економічно ефективних та високопродуктивних електрокаталізаторів РВК.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** РВК здійснюється на окисленій до виділення кисню поверхні металів та сплавів [1]. Використовують

й оксидні покриття, що містять оксиди нікелю, заліза, кобальту на інертній підкладці, наприклад, вуглецевих матеріалах. Запропоновані покриття Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> [2, 3], Fe(Co)OОН [4], [5]. Все більший інтерес привертають шаруваті подвійні гідроксиди перехідних металів завдяки своїм чудовим показникам реакції виділення кисню [6]. У [7] представлено систематичне дослідження серії самопідтримуваних біметалічних гідроксидів на нікелевій піні та їх показників по відношенню до реакції виділення кисню у лужних електролітах. Показано, що ці електроди демонструють значно більшу активність ОЕР, ніж оксид рутенію. Однак пошук ефективних недорогих та стабільних каталізаторів триває. Зокрема, перспективні мультишарові метал-гідроксидні покриття [8].

**Постановка завдання.** Метою досліджень було порівняння активності складових шарів мультишарових покриттів на основі сплавів Ni-Zn-Cu в реакції виділення кисню у лужному середовищі.

**Виклад основного матеріалу. Методика.** Циклічні поляризаційні залежності (ЦВА) та анодні поляризаційні залежності одержані з використанням потенціостату MTech SPG-500L у триелектродній комірці на електродах з платини площею 1 см<sup>2</sup>. Використано насичений хлорид-срібний електрод порівняння, відносно якого наведені потенціали. Значення рН електролітів контролювали рН-метром СТ-6020А. Склади електролітів, в яких проводили дослідження, наведені в табл. 1. Електроліт для осадження нікелю позначено як «Ni», електроліт для осадження сплаву Ni-Zn-Cu – як «NiZnCu» та електроліт для розчинення плівок – як «AB».

**Результати досліджень.** На рисунку 1 представлено циклічні поляризаційні залежності на платині в аміакатно-гліцинатних електролітах для осадження нікелю (кр. 2, електроліт «Ni» у табл. 1), і для осадження мультишарових покриттів на основі сплавів Ni-Zn-Cu (кр. 1, електроліт «NiZnCu» за даними табл. 1). Залежності отримані починаючи з потенціалу розімкненого кола з розгорткою спочатку у катодну сторону, потім – у аноду. На відміну від виділення нікелю, катодна гілка виділення сплаву, що має кросовер (рис. 1, вставка а), вказує на наявність утруднень зародкоутворення на поверхні електроду, внаслідок чого, в сполученні з більшими утрудненнями виділення водню на поверхні сплаву, вона розташовується при більш негативних значеннях потенціалу. Анодна гілка ЦВА в електроліті для осадження нікелю (кр. 2) починається з області потенціалів його активного розчинення, але анодна гілка в електроліті для осадження сплаву (кр. 1) починається при більш позитивних значеннях потенціалу, що свідчить про відсутність в осаді сплаву вільного нікелю. Піки на анодній гілці сплаву (рис. 1, вставка б) належать процесам послідовного окислення фаз, збагачених цинком, міддю і нікелем [9].

Для формування двохімпульсним потенціостатичним методом мультишарових покриттів, в яких перемежуються шари сплаву Ni-Zn-Cu і суміші металів з їх гідроксидами, осаджували шари сплаву при значеннях потенціалу, які відповідають значенням густини струму вище і нижче граничного на катодній гілці ЦВА (кр. 1 рис. 1).

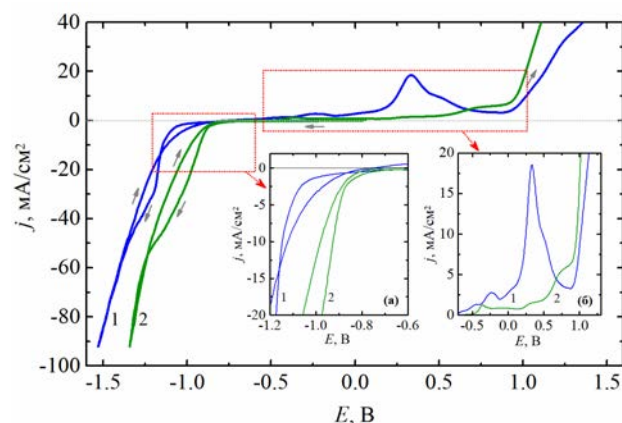
Для визначення фазового складу плівок, їх осаджували з аміакатно-гліцинатного електроліту «NiZnCu» при потенціалі –1,15 В і –1,3 В на катоді з платини і розчиняли в лужному аміачно-гліцинатному електроліті (рис. 2), що не має іонів металів [9]. Порівняння анодних вольтамперо-

грам їх розчинення вказує на зменшення внеску збагачених цинком фаз в склад плівок при збільшенні поляризації при осадженні (менша площа перших піків на кр. 2 в порівнянні з кр. 1), відсутність фази, збагаченої міддю (пік при 0,15 В) та збільшення частки фаз, збагачених нікелем (більша площа останнього піку на кр. 2).

Таблиця 1

Склади електролітів

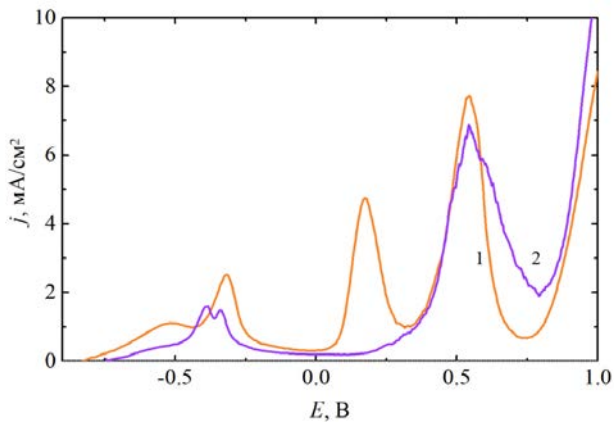
Компонент	Концентрація компонента, моль/дм <sup>3</sup>		
	«NiZnCu»	«Ni»	«AB»
Нікелю сульфат NiSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	0,019	0,357	-
Цинку сульфат ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0,292	-	-
Міді сульфат ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0,002	-	-
Гліцин	0,252	0,643	0,5
Амонію сульфат (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,200	0,139	-
Амонію гідроксид NH <sub>4</sub> OH	0,270	1,864	-
KCl	0,2	0,2	-
Амонію хлорид NH <sub>4</sub> Cl	-	-	0,5
pH	8,5	8,5	10,5



**Рис. 1.** ЦВА на Pt в гліцинатно-аміакатних електролітах для електроосадження мультишарових покриттів на основі сплавів Ni-Zn-Cu (1) і нікелю (2). Вставки – фрагменти катодних (а) і анодних (б) гілок ЦВА. Швидкість розгортки потенціалу 10 мВ/с

Оскільки в процесі формування мультишарових покриттів можливі фазові перетворення, на рис. 3 наведено хроноамперограми осадження бішарів мультишарових покриттів з різним порядком імпульсу потенціалу (рис. 3а) і порівняно вольтамперограми їх розчинення (рис. 3б). З урахуванням впливу сумісного виділення водню, ділянки хроноамперограм осадження шарів (кр. 1 і 2 рис. 3а) на чужорідну основу і на попередній шар відрізняються незначно. При цьому вольтамперограма розчинення бішару з верхнім шаром, що осаджений при –1,3 В (кр. 1 рис. 3б),

має менший пік окислення збагачених цинком фаз та більший пік розчинення фаз, збагачених нікелем, що може свідчити про наявність фазових переходів при зміні імпульсів потенціалу.



**Рис. 2.** Анодні вольтамперограми розчинення в аміачно-гліцинатному електроліті одношарових плівок сплаву NiZnCu, що осаджені з аміачатно-гліцинатного електроліту при потенціалі  $-1,15$  В (1) і  $-1,3$  В (2) до досягнення кількості електрики  $0,6$  Кл/см<sup>2</sup>. Швидкість розгортки потенціалу  $10$  мВ/с

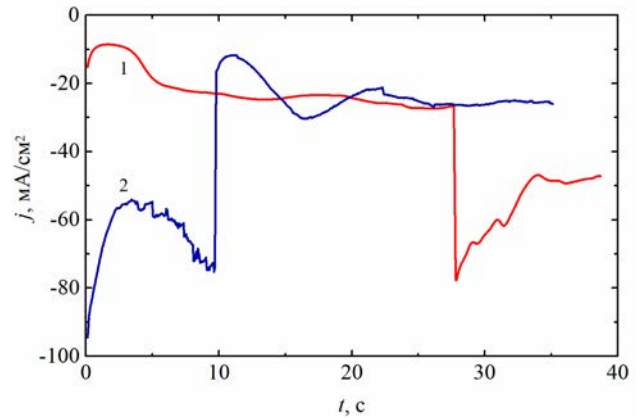
На рисунку 4 представлено анодні поляризаційні залежності у лужному середовищі на різних покриттях. В порівнянні з виділенням кисню на нікелевій плівці (кр. 4), цей процес на одношарових і бішарових плівках сплаву полегшується (кр. 1–3, 1' і 2'), причому більшою мірою у випадку бішарів, з яких після осадження розчиняли цинк шляхом електрохімічного окислення фаз, що їм збагачені (пор. кр. 1 і 1', 2 і 2'). Оскільки, наприклад, залежність 2' не на усіх ділянках вище за залежність 2, можливий висновок, що зміна швидкості виділення кисню пов'язана не тільки з розвиненням поверхні після знецинкування.

Крім того, порядок покриттів за зменшенням перенапруги виділення кисню ( $\Delta\eta$ , мВ) по відношенню до виділення кисню на нікелевій плівці, при деякій поляризації змінюється. Порядок покриттів при меншій поляризації, що відповідає густині струму  $10$  мА/см<sup>2</sup>, має такий вигляд:

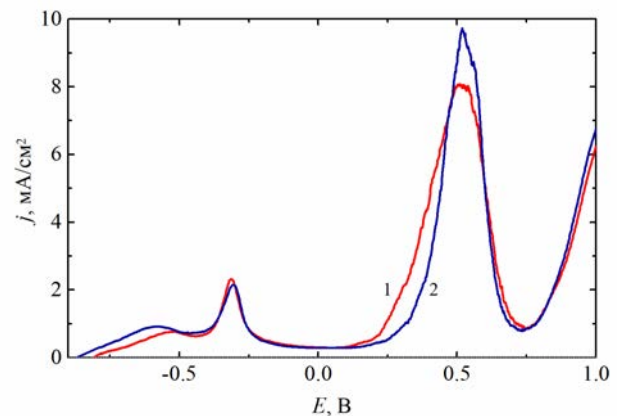
$$\begin{aligned} \llcorner -1,15/-1,3 \gg (-66 \text{ мВ}) &< \llcorner -1,3/-1,15 \gg (-80 \text{ мВ}) \\ &< \llcorner -1,15 \gg (-100 \text{ мВ}) \\ &< \llcorner -1,3/-1,15\text{-EO} \gg (-114 \text{ мВ}) < \llcorner -1,15/1,3\text{-EO} \gg (-116 \text{ мВ}). \end{aligned}$$

Тут покриття позначені за значеннями потенціалу імпульсу осадження ( $-1,15$  В і  $-1,3$  В) і літерів «EO», що означають наявність послідовної електрохімічної обробки.

При більшій поляризації, що відповідає густині струму  $230$  мА/см<sup>2</sup> порядок покриттів має вже такий вигляд:

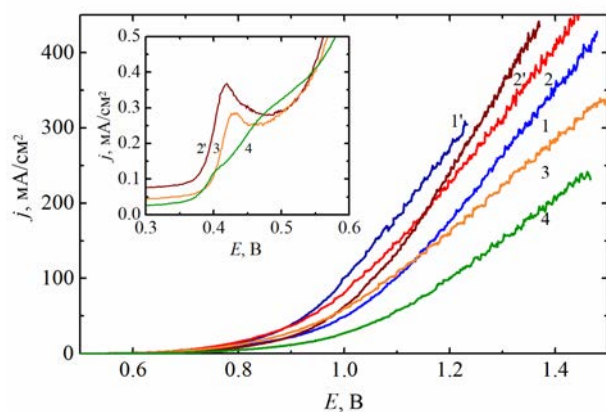


а



б

**Рис. 3.** Хроноамперограми осадження з аміачатно-гліцинатного електроліту (а) бішарів сплавів в режимі  $(-1,15 \text{ В} - 0,6 \text{ Кл/см}^2)/(-1,3 \text{ В} - 0,6 \text{ Кл/см}^2)$  (1) і  $(-1,3 \text{ В} - 0,6 \text{ Кл/см}^2)/(-1,15 \text{ В} - 0,6 \text{ Кл/см}^2)$  (2) та анодні вольтамперограми їх розчинення (б) в аміачно-гліцинатному електроліті зі швидкістю розгортки потенціалу  $5$  мВ/с



**Рис. 4.** Анодні поляризаційні залежності у розчині  $1$  моль/дм<sup>3</sup> NaOH на покриттях Ni (6) і сплавів NiZnCu (1-5), що осаджені в режимі: 3 –  $(-1,15 \text{ В})$ ; 1 –  $(-1,3 \text{ В} - 0,6 \text{ Кл/см}^2)/(-1,15 \text{ В} - 0,6 \text{ Кл/см}^2)$ ; 2 –  $(-1,15 \text{ В} - 0,6 \text{ Кл/см}^2)/(-1,3 \text{ В} - 0,6 \text{ Кл/см}^2)$ ; 1' і 2' – 1 і 2, відповідно, з додатковим знецинкуванням. Швидкість розгортки потенціалу  $1$  мВ/с. Вставка – фрагменти відповідних залежностей

«-1,15» (-127 мВ) < «-1,3/-1,15» (-177 мВ)  
 < «-1,15/1,3-EO» (-246 мВ)  
 < «-1,15/-1,3» (-249 мВ) < «-1,3/-1,15-EO» (-290 мВ).

Тобто, у випадку використання пристрою з малою продуктивністю, доцільно використовувати мультишарове покриття з будь-яким поверхневим шаром та електрохімічною обробкою для зменшення частки фаз, збагачених цинком, і збільшення реальної площі. При необхідності збільшення продуктивності пристрою доцільно використання мультишарового покриття з поверхневим шаром, що осаджений при -1,15 В, з послідовною його електрохімічною обробкою.

При анодній поляризації у лужному середовищі гідроксиди нікелю, який є в мультишаровому покритті в шарах, що осажені при потенціалі -1,3В, а також той, що утворюється в процесі пасивації поверхні нікелю, окислюється до оксогідроксиду  $\beta\text{-Ni}(\text{OH})_2 \leftrightarrow \beta\text{-NiOOH} + \text{H}^+ + \text{e}^-$ .

Аналогічно утворюється і гідроксид міді. Піки на анодних вольтамперограмах, при потенціалах яких проходить дана реакція, спостерігаються на ділянках залежностей рис. 4, які краще видні у відповідному масштабі на вставці до цього рисунку. В порівнянні з поверхнею нікелю (кр. 4), більш активно оксогідроксиди утворюються на поверхні сплаву (кр. 3) та ще більш активно – на поверхні бішару (кр. 2').

Потім ступінь окиснення нікелю в поверхневих сполуках підвищується. Відповідно до [10] каталітичний механізм окислення кисню в процесі редокс-перетворень сполук нікелю описується послідовністю реакцій:



Роль посадочних місць виконує оксогідроксид  $\text{NiOOH}$ , який регенерується на електродній поверхні після реакції (3). Утворення пероксиду  $\text{Ni}(\text{IV})$  на поверхні електрода трактується як хемосорбція іона  $\text{O}_2^{2-}$ .

Залежності рисунку 4 в тафелєвських координатах (рис. 5) виявляють наявність двох прямолінійних ділянок, які свідчать про зміну механізму виділення кисню в умовах підвищення ступеню окислення нікелю і міді в їх оксосполуках. Наявність цієї зміни ділянок у випадку плівці нікелю (кр. 4 рис. 5б) практично непомітна.

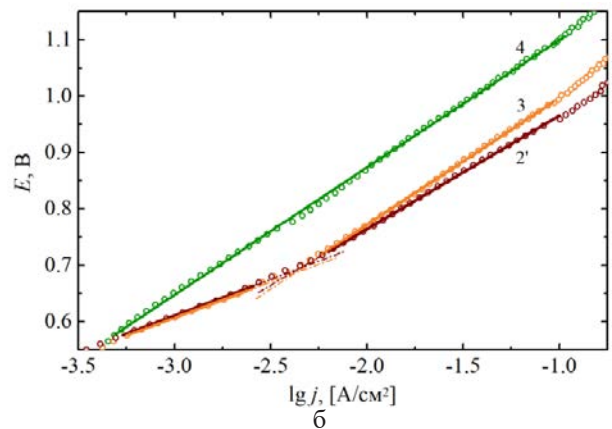
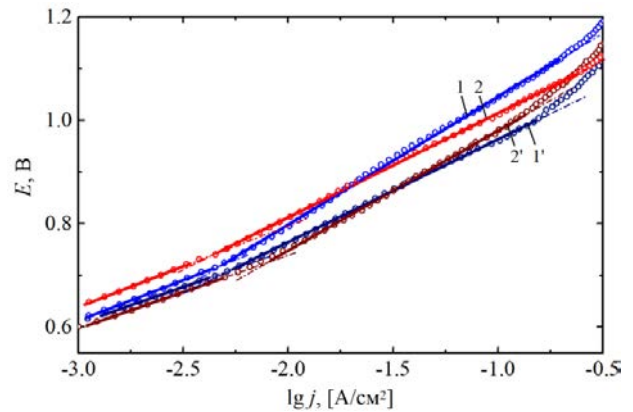


Рис. 5. Тафелєвські залежності на бішарах мультишарового покриття (а) та порівняння залежностей на нікелі, одношаровій плівці сплаву та бішарі (б). Тафелєвські залежності отримані за даними рисунку 4

Тафелєвські параметри за даними рис. 5, що розраховані з використанням геометричної площі поверхні, наведено у табл. 2. Слід відмітити зменшення на 0,1 Ом опору при виділенні кисню на сплаві (в порівнянні з нікелем), та ще менше на 0,4–0,5 Ом – на плівках бішарів. Значення коефіцієнту  $b$  вищі, ніж ті, що наводяться у літературі для початкових ділянок поляризаційних залежностей, але на рівні тих, що приведені для високих густин струму виділення кисню. Значення струмів обміну  $i_0$  для сплавів вищі за значення струму обміну реакції виділення кисню на нікелі.

Електрохімічна обробка бішару з поверхневим шаром, що осаджений при потенціалі -1,3 В, приводить до збільшення струму обміну з 8,55 мкА/см<sup>2</sup> до 31,7 мкА/см<sup>2</sup>, але з поверхневим шаром, що осаджений при потенціалі -1,15В, навпаки – до його зменшення з 37,7 мкА/см<sup>2</sup> до 12,9 мкА/см<sup>2</sup>. Це пов'язано не тільки зі зміною справжньої каталітичної активності, але й зі зміною реальної площі поверхні покриттів.



Таблиця 5

Покриття	R, Ом	b, мВ		i <sub>o</sub> , мкА/см <sup>2</sup>	
		1 ділянка	2 ділянка	1 ділянка	2 ділянка
«-1,15/-1,3»	0,54	156	202	1,41	8,55
«-1,15/1,3-EO»	0,41	126	224	0,60	31,7
«-1,3/-1,15»	0,45	153	250	1,81	37,7
«-1,3/-1,15-EO»	0,50	126	198	0,60	12,9
«Ni»	0,99	224		9,3	
«-1,15»	0,90	126	226	0,6	28,6

**Висновки.** Досліджений процес виділення кисню в лужному електроліті на поверхні складових шарів мультишарових покриттів на основі сплавів NiZnCu, що осаджують з аміакатно-гліцинатного електроліту в режимі: одношарове покриття «-1,15» – при потенціалі -1,15В; бішарові покриття «-1,15/-1,3» та «-1,3/-1,15» – двоімпульсним осадженням при відповідних потенціалах та покриття «-1,15/1,3-EO» та «-1,3/-1,15-EO» додатково електрохімічно обробляли з метою знецінкування.

Дослідження показали, що: (1) при збільшенні поляризації осадження шарів сплавів виявлено зменшення вкладу збагачених цинком і міддю фаз в склад плівки і збільшення частки фаз, збагачених нікелем;

– бішар з верхнім шаром, що осаджений при потенціалі -1,3 В, має менший, ніж з верхнім

шаром, що осаджений при -1,15 В, вклад збагачених цинком фаз і більший – збагачених нікелем, що може свідчити про наявність фазових переходів при зміні імпульсів потенціалу;

– значення струмів обміну для сплавів вищі за значення струму обміну реакції виділення кисню на нікелі;

– порядок покриттів за зменшенням перенапруги виділення кисню по відношенню до виділення кисню на нікелевої плівці, при густині струму 10 мА/см<sup>2</sup> – «-1,15/-1,3» (-66 мВ) < «-1,3/-1,15» (-80 мВ) < «-1,15» (100 мВ) < «-1,3/-1,15-EO» (-114 мВ) < «-1,15/1,3-EO» (-116 мВ), при густині струму 230 мА/см<sup>2</sup> – «-1,15» (-127 мВ) < «-1,3/-1,15» (-177 мВ) < «-1,15/1,3-EO» (-246 мВ) < «-1,15/-1,3» (-249 мВ) < «-1,3/-1,15-EO» (-290 мВ).

#### Список літератури:

- Zhao X., Fuji M., Shirai T., Watanabe H., Takahashi M. Electrocatalytic evolution of oxygen on NiCu particles modifying conductive alumina/nano-carbon network composite electrode. *Science China Technological Sciences*. 2012. Vol. 55. P. 3388-3394.
- Jeon H.S., Park W., Kim J., Kim H., Kim W., Min B.K. Printed Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> film as an electrocatalyst for hydrogen production by a monolithic photovoltaic-electrolysis system. *International journal of hydrogen energy*. 2011. Vol. 36 (3). P. 1924-1929.
- Bathula C., Ahmed A.T.A., Kadam A., Sekar S., Hwang J.H., Lee S.H., Kim H.S. Multi-functional Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> embedded carbon nanotube architecture for oxygen evolution reaction and benzoin oxidation. *Journal of Molecular Liquids*. 2021. Vol. 343. P. 117616.
- Fan R.Y., Zhou Y.N., Li M.X., Xie J.Y., Yu W.L., Chi J.Q., Dong, B. In situ construction of Fe(Co)OOH through ultra-fast electrochemical activation as real catalytic species for enhanced water oxidation. *Chemical Engineering Journal*. 2021. Vol. 426. P. 131943.
- Thangavel P., Kim G., Kim K.S. Electrochemical integration of amorphous NiFe (oxy) hydroxides on surface-activated carbon fibers for high-efficiency oxygen evolution in alkaline anion exchange membrane water electrolysis. *Journal of Materials Chemistry A*. 2021. Vol. 9(24). P. 14043-14051.
- Fan K., Chen H., Ji Y., Huang H., Claesson P.M., Daniel Q., Sun L. Nickel-vanadium monolayer double hydroxide for efficient electrochemical water oxidation. *Nature communications*. 2016. Vol. 7(1). P. 1198.
- Etesami M., Mohamad A.A., Nguyen M.T., Yonezawa T., Pornprasertsuk R., Somwangthanaroj A., Kheawhom S. Benchmarking superfast electrodeposited bimetallic (Ni, Fe, Co, and Cu) hydroxides for oxygen evolution reaction. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 889. P. 161738.
- Maizelis A., Bairachny B. Formation of multilayer metal-hydroxide electrode with developed surface for alkaline water electrolysis. *Materials Today: Proceedings*. 2019. V. 6. P. 226-230.
- Khomenko A., Ryshchenko I., Maizelis A. Influence of Overvoltage During Electrodeposition of Thin Zn-Ni-Cu Alloy Films on Its Phase Composition. *Applications & Properties (NAP): materials of 2023 IEEE 13th International Conference Nanomaterials*. (Slovakia, 10-15 September 2023). IEEE, 2023. p. EN03-1-EN03-4.
- Juodkazis K., Juodkazytė J., Vilkauskaitė R., Jasulaitienė V. Nickel surface anodic oxidation and electrocatalysis of oxygen evolution. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2008. Vol. 12(11). P. 1469-1479.

**Maizelis A.O. CATALYTIC ACTIVITY OF CONSTITUENT LAYERS OF MULTILAYER COATINGS BASED ON Ni-Zn-Cu ALLOYS IN THE OXYGEN EVOLUTION REACTION**

*The paper shows that one of the most important areas of development of oxygen evolution reaction catalysts for various energy storage and conversion devices is the development of cost-effective and high-performance electrocatalysts based on nickel alloys, hydroxides, and oxides. The article is devoted to the assessment of the feasibility of using multi-layer coatings, in which nano- and sub-micron layers of Ni-Zn-Cu alloys and mixtures of these metals with hydroxides periodically alternate, in the reaction of oxygen evolution in alkaline electrolysis. The electrochemical patterns of deposition and dissolution of single-layer and bi-layer thin films of Ni-Zn-Cu alloys, which are components of multilayer coatings, in ammonia-glycinate solutions were considered, and their efficiency in the process of oxygen release in an alkaline solution was determined. The methods of cyclic voltammetry (CVA), anodic stripping voltammetry and linear voltammetry using the MTech SPG-500L potentiostat were used. It was found that with an increase in the polarization of the deposition of alloy layers, the contribution of zinc- and copper-enriched phases to the composition of the films decreases and the proportion of nickel-enriched phases increases. It is shown that the values of the exchange currents for the alloys are higher than the values of the exchange current of the oxygen evolution reaction on nickel. It was determined that the single-layer coating, which is marked as “-1.15” and which is deposited at a potential of -1.15V, the bilayer coatings “-1.15/-1.3” and “-1.3/-1.15”, which are deposited by the two-pulse method at the appropriate potentials, and the “-1.15/1.3-EO” and “-1.3/-1.15-EO” coatings, which are additionally electrochemically treated for the purpose of dezincification, to reduce the overvoltage of oxygen in relation to the oxygen evolution on the nickel film, at a current density of 10 mA/cm<sup>2</sup> are arranged in a row “-1.15/-1.3” (-66 mV) < “-1.3/-1.15” (-80 mV) < “-1.15” (100 mV) < “-1.3/-1.15-EO” (-114 mV) < “-1.15/1.3-EO” (-116 mV), and at a current density of 230 mA/cm<sup>2</sup>, this row has the form “-1.15” (-127 mV) < “-1.3/-1.15” (-177 mV) < “-1.15/1.3-EO” (-246 mV) < “-1.15/-1.3” (-249 mV) < “-1.3/-1.15-EO” (-290 mV).*

**Key words:** Ni-Zn-Cu alloy, oxygen evolution, multilayer coating, oxohydroxides, exchange current.

**Мельник Л.І.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОСОБЛИВОСТІ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ З АНДЕЗИТОМ

У статті представлено результати комплексного дослідження фізико-хімічних та механічних властивостей нових композитних матеріалів, створених на основі водних дисперсій сополімерів та природних наповнювачів, зокрема андезиту з Хустського кар'єру Закарпатської області. Метою роботи було визначення впливу типу полімерного зв'язуючого та концентрації наповнювача на характеристики композитів, зокрема їх механічні, структурні та адсорбційні властивості.

В рамках дослідження було використано два види полімерних зв'язуючих: акрилову дисперсію Policril 590 та бутадієн-стирольний сополімер Latex 2012. Композити виготовлялися з різними концентраціями відсівів андезиту (65–90 мас.%), що дозволило проаналізувати їх вплив на механічні властивості. Результати показали, що композити на основі Latex 2012 мають вищий модуль Юнга, який досягає 56,6 МПа при максимальному вмісті наповнювача, у порівнянні з композитами на основі Policril 590, де максимальний модуль Юнга становить лише 14,1 МПа.

Дослідження також підтвердило, що зростання вмісту відсівів андезиту призводить до збільшення пористості матеріалів. У ході аналізу ізотерм сорбції азоту ( $N_2$ ) було виявлено, що досліджувані зразки демонструють тип II, що вказує на наявність капілярної конденсації та мікропор у структурі. Параметри, що характеризують пористість, свідчать про значні зміни в структурі композитів внаслідок використання різних зв'язуючих.

Оптична мікроскопія, проведена для вивчення порової структури, підтверджує існування залежностей між механічними властивостями та структурними характеристиками. Спостереження пластичних та пружних деформацій виявило кореляцію між цими показниками та граничним навантаженням, що підкреслює важливість вибору зв'язуючого у формуванні властивостей композитних матеріалів.

Встановлено, що вибір полімерного зв'язуючого та концентрація наповнювача є ключовими факторами, які впливають на механічні властивості композитів. Отримані результати можуть бути корисними для подальших розробок у сфері матеріалознавства, зокрема для створення нових композитних матеріалів з покращеними механічними та адсорбційними характеристиками, що можуть знайти застосування в будівництві, промисловості та екології. У зв'язку з цим, перспективи подальших досліджень включають вивчення інших видів наповнювачів та модифікацій полімерних зв'язуючих, що дозволить оптимізувати властивості композитних матеріалів для специфічних потреб.

**Ключові слова:** композит, наповнювач, андезит, латекс, склад, структура, пористість.

**Постановка проблеми.** Унікальність полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) полягає в поєднанні полімерної матриці і наповнювачів, що дозволяє їм використовувати переваги обох складових. Завдяки цьому, ПКМ демонструють високі експлуатаційні характеристики, що робить їх важливими для широкого спектра галузей: від авіації та машинобудування до будівництва, електроніки і виробництва спортивного обладнання.

Однією з ключових сфер досліджень є вибір компонентів композитів для вирішення конкретних завдань. Особливий інтерес в цьому аспекті викликає застосування вулканічних порід як наповнювачів для ПКМ, і зокрема, андезит. Цей матеріал відомий своєю високою міцністю, термічною стійкістю та хімічною інертністю, що робить його

перспективним для використання в полімерних композитах.

Однак комбінація андезиту з полімерними матрицями, в тому числі латексними, потребує подальшого вивчення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомо, що введення андезиту в полімер покращує функціональні властивості полімерних композитів. У роботі [1] було досліджено вплив андезиту як наповнювача на властивості ПКМ на основі епоксидної смоли. Експериментальні результати показують, що додавання андезиту підвищує міцність на розрив, зносостійкість і термічну стабільність композитів, за умови, що наповнювач рівномірно диспергований у матриці. Проте, високі концентрації андезиту можуть нега-

тивно впливати на міцність композиту, що вимагає оптимізації його вмісту для забезпечення еластичності матриці.

Подальші дослідження [2], спрямовані на модифікацію наповнювачів, підтвердили, що використання тетраетоксисилану для обробки андезиту покращує технічні характеристики полімерних композитів при використанні епоксидної матриці. Зокрема, модифіковані наповнювачі підвищують межу міцності, температуру розм'якшення і знижують водопоглинання. Особливо цікавими виявилися композити з бінарним наповнювачем, що поєднує діатоміт і андезит, які демонструють синергетичний ефект при певних співвідношеннях компонентів.

Також ідею модифікації поверхні наповнювачів було розвинуто в роботі [3]. Де досліджено обробку поверхні різних мінеральних наповнювачів, таких як бентоніт, кварцовий пісок і рідке скло тетраетоксисиланом, це створює буферні зони між наповнювачем і полімером, що покращувало механічні та термічні властивості композитів.

**Постановка завдання.** Андезит належить до вулканічних порід і характеризується порфіровою структурою. Його мінеральний склад переважно складається з кварцу, піроксену, плагіоклазу, а також незначної кількості роговообманкових мінералів. Незалежно від способу розробки родовищ, при видобутку андезиту утворюються дрібні та тонкі фракції, які вважаються відсівами. Ці відсіви не придатні для основних виробничих потреб і зазвичай накопичуються у відвалах, що призводить до захаращення земельних площ, зокрема сільськогосподарського призначення. Через це проблема ефективної утилізації андезитових відсівів має важливе практичне значення.

**Метою статті** є дослідження впливу типу полімерного зв'язуючого та концентрації природного наповнювача (відсівів андезиту) на фізико-хімічні та механічні властивості композитних матеріалів, створених на основі водних дисперсій сополімерів, з метою оптимізації їх характеристик та можливості утилізації даних відходів.

**Викладення основного матеріалу.** У цій роботі вивчали полімерні композиційні матеріали на основі водних дисперсій сополімерів з відсівами андезиту Хустського кар'єру (Закарпатська область) як наповнювача. Відсіви андезиту відзначаються високим вмістом  $\text{SiO}_2$  при кількісному співвідношенні  $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3 = 3.5$ , і підвищеною концентрацією оксидів заліза, лужноземельних і лужних металів ( $\text{RO}+\text{R}_2\text{O} = 11,47$  мас.%). Хіміч-

ний і мінералогічний склад детально охарактеризовано у наших попередніх дослідженнях [4].

Як полімерну матрицю використовували водні дисперсії бутадієн-стирольного сополімеру Latex 2012 та полімеру Policril 590, властивості яких описано у наших роботах [5], а технологія виготовлення дослідних зразків у роботі [6].

Для вивчення отриманих зразків застосовувався комплекс фізико-хімічних методів аналізу. Огляд поверхні зразків здійснювався за допомогою оптичного мікроскопа з цифровою камерою моделі H5D (Delta Optical, Китай) та програмного забезпечення «ScoreTek View» 1.0.0.1 (ScoreTek Optics Electronics, Китай). Характеристики пористої структури зразків визначали за методом адсорбції-десорбції азоту ( $\text{N}_2$ ) при температурі  $-196^\circ\text{C}$ , використовуючи прилад Quantachrome NOVA-2200e (США). Специфічну площу поверхні ( $S_{\text{вБЕТ}}$ ,  $\text{м}^2/\text{г}$ ) розраховували багатоточковим методом БЕТ [7], а загальний об'єм пор ( $V_{\text{вР}}$ ,  $\text{см}^3/\text{г}$ ) визначали за максимальним об'ємом адсорбованого азоту при відносному тиску  $P/P_0 \approx 0,99$ . Об'єм мікропор ( $V_{\mu}$ ,  $\text{см}^3/\text{г}$ ) розраховували методом t-plot і визначали відсоткове співвідношення мікропор за формулою:

$$V_{\mu}, \% = \left( \frac{V_{\mu}}{V_{\Sigma}} \right) \times 100$$

Для оцінки абразивної стійкості зразків використовували методику згідно з ДСТУ Б.В.2.7-212:2009 за допомогою круга стирання типу Беме. Механічні властивості визначали на основі діаграм «деформація-навантаження» при одновісному стисненні з використанням установки ІМАШ-20-78 у поєднанні з аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) та ПК, при кімнатній температурі у вакуумі  $10^{-5}$  Торр [8].

Досліджено композиції з високим вмістом наповнювача, який змінювався в межах 65–90 мас.% (табл. 1). Характеристики пористої структури та механічні властивості композитів значно варіювалися залежно від типу полімерного зв'язуючого, що дозволило визначити оптимальні умови для отримання матеріалів з бажаними характеристиками.

Аналіз результатів досліджень демонструє, що властивості розроблених ПКМ значно залежать від концентрації наповнювача і типу полімерного зв'язуючого.

Композити на основі акрилової дисперсії Policril 590 мають відносно низьке водопоглинання, яке коливається від 2,20 до 2,73 % при збільшенні концентрації наповнювача з 65 до 90 мас.%. Композити на основі Latex 2012 демонструють більші значення водопоглинання, які

Склад і властивості композиційного матеріалу

Склад композиту	Концентрація наповнювача, С, мас. %	Показники				
		Водопоглинання через 24 год, %	Відкрита пористість, %	Загальна пористість, %	Середня густина, г/см <sup>3</sup>	Стираність, г/см <sup>2</sup>
Policril 590 + Андезит	65	2,20	3,14	9,89	1,43	0,020
	75	2,32	3,97	29,78	1,71	0,019
	85	2,66	5,04	40,11	1,89	0,013
	90	2,73	5,31	43,51	1,95	0,012
Latex 2012 + Андезит	65	4,42	6,83	18,56	1,55	0,094
	75	5,42	9,94	35,78	1,74	0,057
	85	6,15	10,71	36,45	1,83	0,031
	90	6,40	12,34	42,23	1,93	0,021

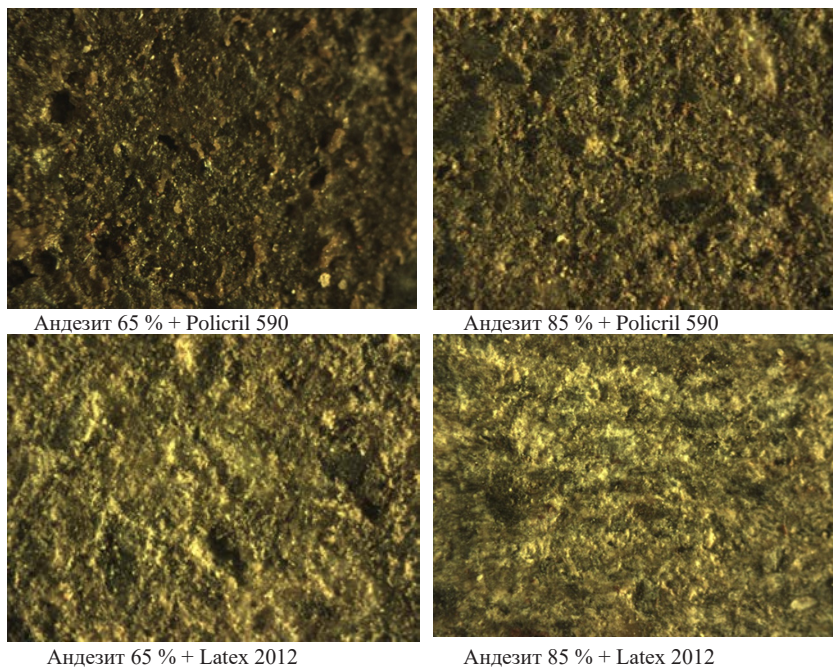


Рис. 1. Оптичний аналіз порової структури композитів

зростають від 4,42 до 6,40 % при аналогічному підвищенні вмісту андезиту. Це свідчить про те, що Latex 2012 відносно менше впливає на властивості поверхні, гідрофільність та щільність структури порівняно з Policril 590.

Аналіз показників пористості показав лінійне зростання як відкритої, так і загальної пористості при підвищенні концентрації андезиту для обох типів композитів. Для композитів з Policril 590 відкрита пористість варіюється від 3,14 до 5,31 %, тоді як для композитів з Latex 2012 ці показники вищі і змінюються від 6,83 до 12,34 %. Загальна пористість демонструє схожу динаміку, зростаючи від 9,89 до 43,51% для Policril 590 та від 18,56 до 42,23 % для Latex 2012.

Стираність обох типів композитів зменшується зі зростанням концентрації наповнювача. Композити з Policril 590 мають нижчу стира-

ність (0,020–0,012 г/см<sup>2</sup>) в порівнянні з ПКМ на основі Latex 2012 (0,094–0,021 г/см<sup>2</sup>). Це свідчить про те, що композити на основі Policril 590 мають кращу зносостійкість. Середня густина композитів також зростає з підвищенням концентрації наповнювача, але для Policril 590 цей показник є дещо вищим (1,43–1,95 г/см<sup>3</sup>) порівняно з Latex 2012 (1,55–1,93 г/см<sup>3</sup>).

Оптична мікроскопія показала, що в'язкість полімерної матриці значно впливає на пористу структуру композиту. Policril 590, маючи вищу в'язкість, сприяє формуванню щільнішої порової структури порівняно з Latex 2012. Це підтверджується візуальним аналізом порової структури зразків (рис. 1), де при однаковій концентрації наповнювача зменшується пористість у композиціях на основі Policril 590.

У рамках дослідження було проведено аналіз енергетичного стану поверхні частинок наповню-

вача, що відіграє ключову роль у їхній взаємодії з полімерними зв'язувальними. Встановлено, що ізотерми сорбції азоту (рис. 2) для досліджуваних зразків відповідають ізотермам типу II (b) за класифікацією де Бура [8].

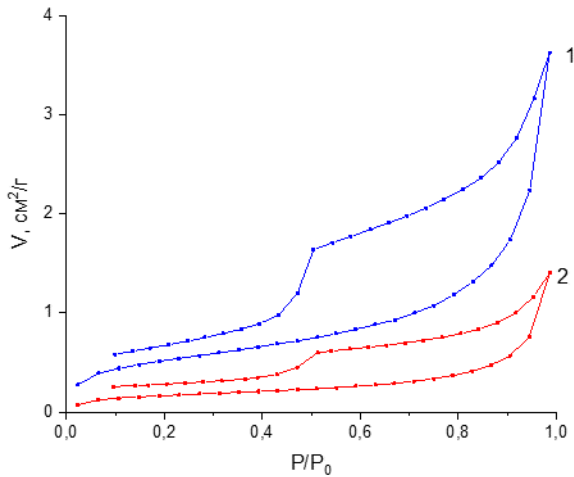


Рис. 2. Ізотерми сорбції азоту (N<sub>2</sub>) для систем на основі андезиту з використанням зв'язуючого: 1 – Latex 2012, 2 – Policril 590

Це свідчить про типову сорбційну поведінку матеріалів із пористою структурою, яка включає капілярну конденсацію, що створює петлю гістерезису. Наявність гістерезису свідчить про мікропористу структуру композитів, що підтверджується характером порової структури (табл. 2).

Таблиця 2

**Характеристика порової структури**

Зразки	Питома поверхня BET, м²/г	Загальний об'єм пор при P/P₀= до 1, см³/г	Середній розмір пор, нм
Андезит	11,91	7,00*10 <sup>-3</sup>	2,34
Андезит + Policril 590	0,77	2,18*10 <sup>-3</sup>	5,69
Андезит + Latex 2012	1,97	5,24*10 <sup>-3</sup>	5,83

Відсівів андезиту мають розвинену питому поверхню (11,91 м²/г), що сприяє активній взаємодії із полімерними матрицями.

При поєднанні відсівів андезиту з акриловою дисперсією Policril 590, питома поверхня значно зменшується до 0,77 м²/г, тобто в 15,7 рази порівняно з вихідним андезитом. Це вказує на високу ефективність впливу акрилової дисперсії на властивості поверхні частинок андезиту та зміцнення зв'язку на межі поділу рідкої та твердої фаз з відповідним підвищенням показників фізико-механічних характеристик. При цьому також дося-

гається менший об'єм пор (2,18 × 10<sup>-3</sup> см³/г) при більшому середньому розмірі (5,69 нм).

Використання бутадієн-стирольної дисперсії Latex 2012, хоча також знижує питому поверхню до 1,97 м²/г, тобто 6,1 рази, та зберігає більш розвинену пористу структуру порівняно з Policril 590. Цей композит має більший об'єм пор (5,24 × 10<sup>-3</sup> см³/г) і дещо більший середній розмір пор (5,83 нм).

Результати аналізу структурних характеристик досліджуваних композитів демонструють значні зміни в їх механічних властивостях, що підтверджується вимірюваннями модуля Юнга, який є ключовим показником пружності матеріалів (рис. 3). Виявлено, що тип полімерної матриці суттєво впливає на характеристики полімерних композитів. Зокрема, зі збільшенням вмісту андезиту в композиціях спостерігається підвищення модуля пружності.

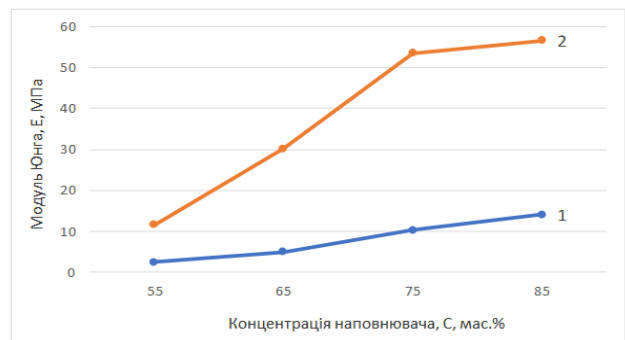
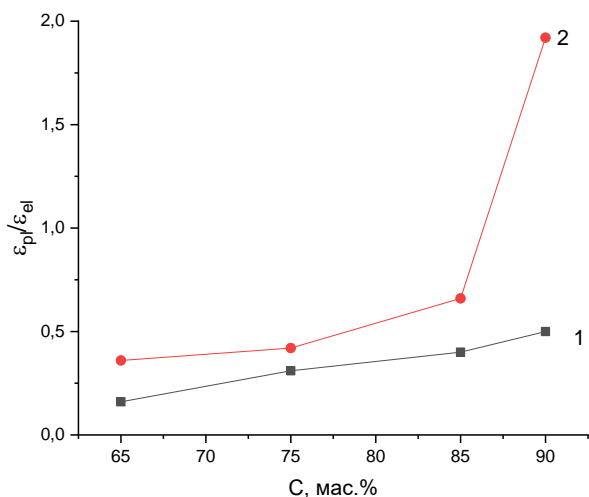


Рис. 3. Залежність Модуля Юнга від концентрації наповнювача для систем: Policril 590 + андезит (1), Latex 2012 + андезит (2)

У випадку композитів, виготовлених на основі бутадієн-стирольного зв'язуючого Latex 2012, модуль Юнга зростає з 11,6 МПа при 65 мас.% андезиту до 56,6 МПа при 90 мас.% наповнювача. Ця тенденція зберігається і для композитів на основі акрилової дисперсії Policril 590, хоча значення модуля пружності є значно нижчими, досягаючи лише 14,1 МПа при максимальному наповненні 90 мас.% андезиту.

Аналіз усіх досліджених композицій підтверджує, що ключовими факторами, які впливають на їх механічні властивості, є тип зв'язуючої речовини та рівень концентрації наповнювача. На рис. 4 показані графіки співвідношення пластичних і пружних деформацій ( $\epsilon_{pl}/\epsilon_{el}$ ) в залежності від концентрації наповнювача та типу полімерного зв'язуючого.

З графіків видно, що зі збільшенням вмісту наповнювача значення  $\epsilon_{pl}/\epsilon_{el}$  поступово зростає, що корелює з підвищенням граничного наванта-



**Рис. 4.** Співвідношення між пластичною та пружною деформаціями в залежності від концентрації андезиту для систем: Policril 590 + андезит (1), Latex 2012 + андезит (2)

ження ( $P_{\max}$ ). Це збільшення є більш вираженим у системах, виготовлених з використанням Latex 2012. Концентраційна залежність ефективного модуля Юнга ( $E$ ) для цих систем повністю співвідноситься з даними для  $\epsilon_{pl}/\epsilon_{el}$ , оскільки  $E \sim 1/\epsilon_{el}$ . Максимальний ефективний модуль Юнга спостерігається у композиті Latex 2012 з 90 мас.% андезиту, що свідчить про високу ефективність використання даного зв'язуючого в формуванні механічних властивостей композитів.

#### Список літератури:

1. 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>.
2. Jimsher Aneli, Omari Mukbaniani, Eliza Markarashvili, Gennady Zaikov, Elen Klodzinska. Polymer composites on the basis of epoxy resin with mineral fillers modified by tetraetoxysilane. *Chemistry & chemical technology*. 2013. Vol. 7. №2, P. 141-145.
3. Lana Shamanauri, Jimsher Aneli, Victor Zviadauri. New Polymer Composites on the Basis of Residual Polyethyleneterephthalate. *Bulletin of the georgian national academy of sciences*. 2021. Vol. 15. №4, P. 57-62.
4. 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>.
5. 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>.
6. 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).
7. Brunauer S., Emmett P.H., Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society*. 1938. Vol. 60. № 2. P. 309. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>.
8. 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.jpics.2006.01.042>.

#### Висновки.

1. Визначено ефективність та особливості використання відсівів андезиту як наповнювача при підвищених концентраціях 65–90 мас.% зі використанням сополімеру Latex 2012i та полімеру Policril 590i як основних компонентів матриці.

2. Результати аналізу механічних характеристик композитних матеріалів свідчать про суттєвий вплив типу полімерного зв'язуючого на їхні фізико-механічні властивості. Використання Latex 2012 як зв'язуючого забезпечує вищий модуль Юнга в порівнянні з акриловою дисперсією Policril 590.

3. Зростання вмісту відсівів андезиту в композитах призводить до підвищення модуля пружності, що демонструє пряму залежність між концентрацією наповнювача та механічними властивостями матеріалів. При концентрації 90 мас.% відсівів андезиту спостерігається максимальне зростання модуля Юнга, що досягає 56,6 МПа для композитів на основі бутадієн-стирольного латексу Latex 2012.

4. Аналіз структури показав наявність капілярної конденсації та мікропор у композитах, що впливають на їх водопоглинання та пористість. Зокрема, пористість зразків композитів на основі Latex 2012 є вищою, ніж у системах з Policril 590.

5. Отримані результати вказують на доцільність подальшого вивчення впливу різновидів наповнювачів та модифікацій їх поверхні на характеристики композитних матеріалів, з метою оптимізації відповідно до умов практичного використання.

## Melnyk L.I. FEATURES OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF POLYMER COMPOSITES WITH ANDESITE

*The article presents the results of a complex study of the physicochemical and mechanical properties of new composite materials created on the basis of aqueous dispersions of copolymers and natural fillers, in particular andesite from the Khust quarry in the Transcarpathian region. The aim of the work was to determine the influence of the type of polymer binder and the concentration of the filler on the characteristics of composites, in particular, their mechanical, structural and adsorption properties.*

*As part of the study, two types of polymer binders were used: acrylic dispersion Policril 590 and butadiene-styrene copolymer Latex 2012. Composites were made with different concentrations of andesite screenings (65–90 wt.%), which made it possible to analyze their influence on mechanical properties. The results showed that the composites based on Latex 2012 have a higher Young's modulus, reaching 56.6 MPa at the maximum filler content, compared to the composites based on Policril 590, where the maximum Young's modulus is only 14.1 MPa.*

*The study also confirmed that an increase in the content of andesite screenings leads to an increase in the porosity of materials. During the analysis of nitrogen (N<sub>2</sub>) sorption isotherms, it was found that the studied samples show type II, which indicates the presence of capillary condensation and micropores in the structure. The parameters characterizing the porosity indicate significant changes in the structure of the composites due to the use of different binders. Optical microscopy, conducted to study the pore structure, confirms the existence of dependencies between mechanical properties and structural characteristics. The observation of plastic and elastic deformations revealed a correlation between these parameters and the ultimate load, which emphasizes the importance of the choice of binder in shaping the properties of composite materials.*

*It was established that the choice of polymer binder and the concentration of the filler are key factors that affect the mechanical properties of composites. The obtained results can be useful for further developments in the field of materials science, in particular for the creation of new composite materials with improved mechanical and adsorption characteristics that can be used in construction, industry and ecology. In this regard, the prospects for further research include the study of other types of fillers and modifications of polymer binders, which will allow optimizing the properties of composite materials for specific needs.*

**Key words:** composite, filler, andesite, and latex, composition, structure, porosity.



УДК 676.038.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/08>**Мовчанюк О.М.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Остапенко А.А.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ ПАПЕРУ ДЛЯ ГОФРУВАННЯ З ВТОРИННОГО ВОЛОКНА КУКУРУДЗЯНИМИ КРОХМАЛЯМИ

Стаття присвячена актуальній проблемі – підвищенню механічної міцності паперу для гофрування з вторинного волокна. Для цього найчастіше використовують крохмалі зубоподібної кукурудзи, що має величезний обсяг світового виробництва. Воскова кукурудза також використовується для виготовлення паперу.

Метою дослідження було оцінювання впливу витрати та ступеня заміщення крохмалю зубоподібної й воскової кукурудзи для проклеювання в масі на механічні показники паперу для гофрування з макулатури.

Для дослідження було обрано макулатуру марки МС-5Б-2, що широко використовується у виробництві паперу для гофрування, а також модифіковані кукурудзяні крохмалі з різними значеннями ступеня заміщення від 0,035 до 0,053. Витрата крохмалів варіювалася від 0,8 до 1,5 %.

Встановлено вплив крохмалів на показники механічної міцності лабораторних зразків паперу для гофрування. Запропоновано раціональні значення витрати та ступеня заміщення крохмалів для здійснення масного проклеювання макулатурного паперу для гофрування задля досягнення максимальних показників його механічної міцності. У разі необхідності покращити марку паперу з марки Б-3 до Б-2 пропонується застосувати мінімальні з досліджених значень витрати і ступеня заміщення (0,8 % і 0,035 відповідно) крохмалю зубоподібної кукурудзи, як більш економічний варіант. У випадку необхідності знизити масу 1 м<sup>2</sup> паперу за збереження його механічної міцності необхідно використати крохмаль зі ступенем заміщення 0,042 і збільшити витрату до 1 %.

Отримані результати допоможуть підвищити ресурсоощадність виробництва макулатурного паперу для гофрування, обрати найбільш ефективний і економічний крохмаль для масного проклеювання паперу. У подальшому планується провести аналогічні дослідження з крохмалями іншого походження, насамперед, з пшеничним та картопляним.

**Ключові слова:** макулатура, модифікований кукурудзяний крохмаль, витрата, ступінь заміщення, папір для гофрування, механічна міцність.

**Постановка проблеми.** Папір для гофрування разом з картоном для плоских шарів забезпечує міцність гофрованого картону [1, с. 98–99]. Тому чим міцнішим є цей папір, тим рентабельнішим він буде для виробників і більш популярним серед споживачів. Міцніший папір можна виготовляти зі зниженою масою 1 м<sup>2</sup> за дотримання нормативних вимог до нього, а, отже, раціональніше використовувати волокнисті напівфабрикати, зменшуючи при цьому масу тари і упаковки.

Порівняно з папером і картоном з первинного волокна, для яких характерна відносна сталість міцності та інших властивостей, вторинне волокно відрізняється широким інтервалом мінливості властивостей. А, враховуючи, що основна маса таропакувальних видів паперу та картону ви-

робляється із застосуванням вторинного волокна, або повністю з нього, неважко зрозуміти особливу актуальність стабілізації та підвищення властивостей міцності цих матеріалів [1, с. 101, 111].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Пильна увага зазначеної теми простежується у більшості досліджень, присвячених вторинному волокну, оскільки макулатура – це ресурсозберігаюче джерело придатного для багаторазового використання волокна, що для України має особливе значення, оскільки більшість вітчизняних паперових підприємств виробляють свою продукцію з макулатури. Однак через багаторазову участь вторинного волокна у технологічних процесах переробки, спостерігається тенденція постійного зниження якості макулатури, що, в свою чергу,

призводить до зниження якості готової картонно-паперової продукції з неї [2, с. 266].

Одним із сучасних способів підвищення механічної міцності макулатурного паперу є хімічні речовини, що вводяться в паперову масу або наносяться на його поверхню [1, с. 3; 3, с. 6–10]. Крохмалепродукти залишаються затребуваним зміцнюючим засобом у технології тарних видів паперу та картону [4, с. 45; 5, с. 54].

Крохмаль є основною складовою зернових і бобових, а також коренеплодів і бульб, таких як маніок і картопля. Незалежно від джерела, крохмальна гранула складається з двох основних полімерів: лінійної амілози та розгалуженого амілопектину [3, с. 20–21; 6, с. 1546; 7, с. 14]. Основними факторами, що впливають на властивості крохмалю, є: співвідношення між амілозою та амілопектином; середня довжина ланцюга амілози та амілопектину; і спосіб упаковки амілопектину всередині напівкристалічних доменів крохмальних гранул [6, с. 1546].

Найважливішим рослинним джерелом крохмальних продуктів є кукурудза. Сортом кукурудзи, який найчастіше використовують як джерело крохмалю для виготовлення паперу, є зубоподібна кукурудза, що має величезний обсяг світового виробництва. Воскова кукурудза вирощується виключно для нехарчових цілей і також використовується для виготовлення паперу [8, с. 1936; 3, с. 22].

**Постановка завдання.** Метою даного дослідження було оцінювання впливу витрати та ступеня заміщення крохмалю зубоподібної й воскової кукурудзи під час проклеювання в масі на механічні показники паперу для гофрування з макулатури.

**Виклад основного матеріалу.** Макулатура марки МС-5Б-2 [9, с. 5], що широко використовується у виробництві паперу для гофрування, піддавалася розпуску та розмелюванню на лаборатор-

ному комплекті ЛКР-1. Після розпуску протягом 20 хв. макулатурну масу розмелювали з відбором проб, до досягнення ступеня помелу маси 45 °ШР.

Для складання композиції паперової маси використовували крохмаль зубоподібної кукурудзи зі ступенем заміщення 0,035; 0,042; 0,053 та крохмаль воскової кукурудзи зі ступенем заміщення 0,037; 0,043; 0,050.

Варіння крохмального клею відбувалося у герметичному реакторі, що оснащений двошвидкісною мішалкою лопатевого типу. Підйом температури (з 20 до 85°C) проводився з заданою швидкістю, після чого температура підтримувалася на рівні 85°C до готовності клею. Концентрація крохмального клею становила 30 г/дм<sup>3</sup>.

Паперова маса готувалась з різною витратою крохмального клею (0,8 %; 1,0 %; 1,5 %). Лабораторні зразки паперу масою 140 г/м<sup>2</sup> виготовляли на листовідливному апараті типу Нобель-Вуд. Дозування крохмалю здійснювалося у формувальну камеру апарату після наповнення її водою і додавання маси. Після кондиціонування за відносної вологості повітря (50±2)% та температури (23±1)°C упродовж не менше 2,5 год зразки випробовувалися. Випробування зразків проводилося за стандартними методиками. Визначалися такі показники: опір площинному стисненню гофрованого зразка паперу; абсолютний опір продавлюванню; опір торцевому стисненню гофрованого зразка паперу; міцність під час розтягування.

Відомо, що до складу крохмалю входять два типи полімерів – амілоза й амілопектин, які складаються з ланок  $\alpha$ -D-глюкози, пов'язаних між собою глікозидними зв'язками. Амілоза має лінійну будову та V-спіральну конформацію, а амілопектин – розгалужену будову (рис. 1) [8, с. 1936; 10, с. 284].

Амілоза складається з лінійних ланцюгів, у яких альфа-глікозидні зв'язки з'єднують C1 однієї одиниці з C4 наступної. Залежно від рос-

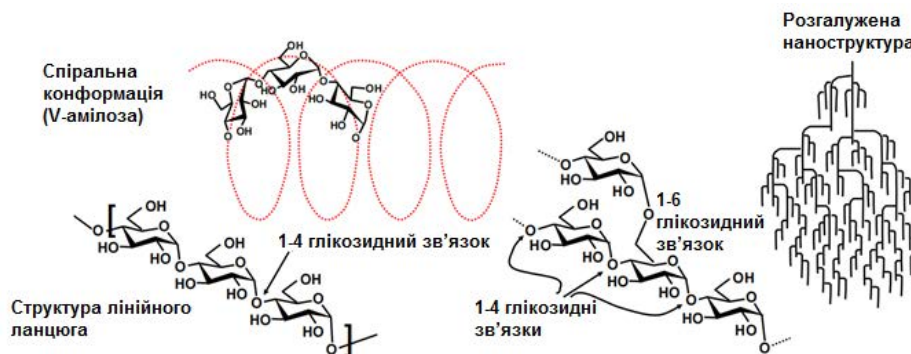


Рис. 1. Дві форми макромолекул крохмалю, що співіснують у більшості крохмалистих рослинних матеріалів

линного джерела амілоза часто має ступінь полімеризації від 800 до 3000. Більш складною формою є амілопектин. Високий рівень розгалуження в амілопектині призводить до відносно щільних, компактних молекул зі ступенем полімеризації близько 20000 [8, с. 1936].

Молекула амілози, коли її розчиняють у воді, набуває різних спіральних конформацій. Ланцюги амілози можуть бути або у вигляді подвійних спіралей (амілоза типу А та В), або у вигляді спіралі, що утворена з одного ланцюга (V-амілоза). В амілозних компонентах нативного кукурудзяного крохмалю, як правило, переважає А-амілоза [8, с. 1936].

Одноланцюгові спіралі V-типу мають центральну порожнину, яка є відносно гідрофобною. Орієнтація –ОН груп спіралей є такою, що вони в основному роблять зовнішню частину котушок гідрофільною, тоді як всередині спіралей полярні групи відсутні. Як наслідок, будь-які гідрофобні компоненти матеріалу, такі як мономери жирних кислот, ймовірно, будуть міститися як сполуки включення в V-спіралі. Схоже, що частка V-амілози зростає пропорційно до кількості присутніх олеофільних мономерів. Зі збільшенням частки амілози збільшується вміст V-амілози в кристалічній фазі. Однак іноді домінують дво-спіральні форми амілози [8, с. 1936].

Амілоза і амілопектин мають різні властивості, відповідно поведуть себе по-різному і під час варіння, і в готових дисперсіях. Амілозна форма крохмалю, як правило, демонструє найбільш значні ефекти ретроградації. Спочатку розчиняється частина амілози і набуває вигляду непошкоджених V-спіралей. Розчинена амілоза з кукурудзи поступово набуває форми подвійної спіралі (А-спіралі), яка може самоасоціювати. Цей процес, що називають ретроградацією, як правило, погіршує здатність крохмалю як сполучного агента у папері. Ретроградації також сприяє низький рН і присутність катіонів металів, таких як кальцій або алюміній (рис. 2) [3, с. 19–20].

Амілопектин зазвичай характеризується невисоким рівнем ретроградації, відносно швидко після процесу клейстеризації він може піддаватися агломерації, що призводить до багатоланцюгових структур, але такі зміни вареного амілопектину вважаються «оборотними» [3, с. 19]. Рівень амілопектину у крохмалі складає приблизно 72 %, решту становить амілоза. Амілоза в кукурудзі має середній ступінь полімеризації близько 960–990. Оскільки її молекулярна маса є відносно низькою, амілоза крохмалю зубоподібної кукурудзи більш

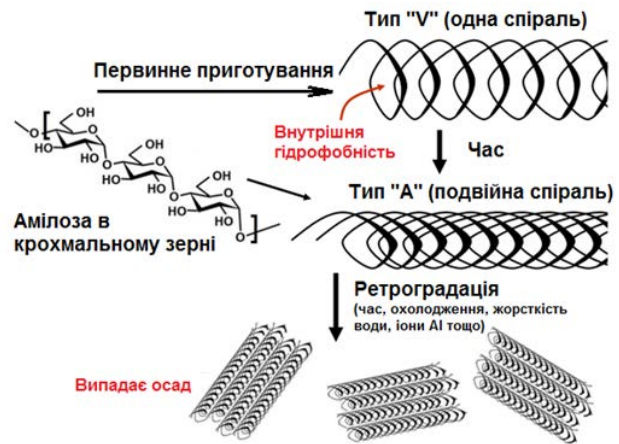


Рис. 2. Зміни у конформації та колоїдній формі амілози крохмалю в результаті варіння, зберігання та впливу інших чинників

схильна до ретроградації. Температура клейстеризації такого крохмалю становить 75–80°C [3, с. 22–24].

Крохмаль воскової кукурудзи практично не містить амілози і майже вільний від ефектів ретроградації після приготування. Температура клейстеризації такого крохмалю є нижчою (65–70°C) [3, с. 24], тому він є більш привабливим з огляду на собівартість приготування і стабільність готових клеїв.

Результати випробування отриманих зразків паперу представлені в таблиці 1. Зразки, що виготовлені без додавання крохмального клею (базовий варіант), відповідають паперу для гофрування марки Б-3, що з усіх марок стандарту має найнижчі норми за показниками механічної міцності [11, с. 6].

Після введення у масу крохмалю обох сортів кукурудзи всі визначені показники зростають. Але зростання показників для крохмалів різного ступеня заміщення і витрати не було однаковим. В таблиці 2 подано порівняльний аналіз приросту показників механічної міцності зразків паперу для всіх досліджених крохмалів. Помітно, що показники покращуються для крохмалів воскової кукурудзи від 5,3 до 37,5 %, для зубоподібної – від 5,3 до 35 %. Більш чутливим до додавання крохмалів виявився показник абсолютного опору продавлюванню, що є вкрай важливим для витримування деформаційних зусиль від рифлених валів під час гофрування паперу на гофромашині [1, с. 99]. Максимальний приріст показника зафіксовано за витрати крохмалю зубчастій кукурудзі 1 % і ступеня заміщення 0,035, а у випадку воскової кукурудзи – за витрати крохмалю 1,5 % і ступеня заміщення 0,050.

## Показники механічної міцності паперу

Витрата крохмалю, %	Ступінь заміщення крохмалю	Опір площинному стисненню гофрованого зразка паперу, Н	Абсолютний опір продавлюванню, кПа	Опір торцевому стисненню гофрованого зразка паперу, кН/м	Міцність під час розтягування, кН/м
0 (базовий варіант)	–	175	323	1,30	5,7
<b>Крохмаль зубоподібної кукурудзи</b>					
0,8	0,035	190	403	1,63	6,3
1,0	0,035	210	436	1,68	6,7
1,5	0,035	215	431	1,63	7,3
0,8	0,042	205	407	1,56	6,3
1,0	0,042	220	434	1,74	6,7
1,5	0,042	205	397	1,51	6,7
0,8	0,053	200	394	1,52	6,0
1,0	0,053	220	409	1,57	6,1
1,5	0,053	210	387	1,68	6,4
<b>Крохмаль воскової кукурудзи</b>					
0,8	0,037	220	403	1,57	6,5
1,0	0,037	220	411	1,68	7,1
1,5	0,037	205	398	1,63	6,7
0,8	0,043	210	397	1,61	6,0
1,0	0,043	220	399	1,68	6,2
1,5	0,043	220	397	1,76	6,1
0,8	0,050	205	362	1,58	6,3
1,0	0,050	210	414	1,56	6,5
1,5	0,050	220	444	1,68	6,7

Шляхом використання для масного проклеювання модифікованого крохмалю з обох сортів кукурудзи, всіх досліджених значень витрати і ступеня заміщення, було отримано зразки паперу марки Б-2, з вищими показниками механічної міцності.

Опір торцевому стисненню гофрованого зразка паперу, який характеризує здатність протистояти силам, що стискають гофрокартон вздовж гофрів під час штабелювання ящиків [1, с. 99], найбільше зростає (на 33,8 %) за витрати 1,0 % для крохмалю зубоподібної кукурудзи зі ступенем заміщення 0,042 і на 35,4 % за витрати 1,5 % для крохмалю воскової кукурудзи зі ступенем заміщення 0,043.

Показник міцності під час розтягування паперу для гофрування має велике значення для забезпечення жорсткості ребер ящика з гофрокартону [1, с. 99]. Цей показник максимально (на 28,1 %) зростає за витрати 1,5 % крохмалю зубоподібної кукурудзи зі ступенем заміщення 0,035 і на 24,6 % – за витрати 1,0 % крохмалю воскової кукурудзи зі ступенем заміщення 0,037.

Найбільше зростання водночас і показника опору площинному стисненню гофрованого зразка паперу, що забезпечує його жорсткість і здатність

протистояти зім'яттю гофрів в процесі виготовлення гофрокартону та його перероблення [1, с. 98], і абсолютного опору продавлюванню, і опору торцевому стисненню гофрованого зразка (на 25,7; 34,4 і 33,8 % відповідно) спостерігається при додаванні крохмалю зубоподібної кукурудзи зі ступенем заміщення 0,042, за витрати 1,0 %. У випадку додавання крохмалю воскової кукурудзи максимальні значення перших двох вказаних показників (на 25,7 і 37,5 % відповідно) досягнуто за ступеня заміщення 0,050, за витрати 1,5 %. Третій показник демонструє максимальне зростання за ступеня заміщення 0,043 і такої ж витрати 1,5 %.

**Висновки.** Виконаний лабораторний комплекс наукових досліджень довів можливість підвищення механічних властивостей паперу для гофрування з макулатури марки МС-5Б-2 шляхом масного проклеювання модифікованими крохмалю зубоподібної та воскової кукурудзи з різними значеннями ступеня заміщення і витрати.

У разі необхідності покращити марку паперу з Б-3 до Б-2 достатньо застосувати мінімальні з досліджених значень витрати і ступеня заміщення (0,8 % і 0,035 відповідно) крохмалю зубо-

## Приріст показників механічної міцності зразків

Витрата крохмалю, %	Ступінь заміщення крохмалю	Приріст показника від базового, %			
		Опір площинному стисненню гофрованого зразка паперу	Абсолютний опір продавлюванню	Опір торцевому стисненню гофрованого зразка паперу	Міцність під час розтягування
<b>Крохмаль зубоподібної кукурудзи</b>					
0,8	0,035	8,6	24,8	25,4	10,5
1,0	0,035	20,0	35,0	29,2	17,5
1,5	0,035	22,9	33,4	25,0	28,1
0,8	0,042	17,1	26,0	20,0	10,5
1,0	0,042	25,7	34,4	33,8	17,5
1,5	0,042	17,1	22,9	16,2	17,5
0,8	0,053	14,3	22,0	16,9	5,3
1,0	0,053	25,7	26,6	20,8	7,0
1,5	0,053	20,0	19,8	29,2	12,3
<b>Крохмаль воскової кукурудзи</b>					
0,8	0,037	25,7	24,8	20,8	14,0
1,0	0,037	25,7	27,2	29,2	24,6
1,5	0,037	17,1	23,2	25,4	17,5
0,8	0,043	20,0	22,9	23,8	5,3
1,0	0,043	25,7	23,5	29,2	8,8
1,5	0,043	25,7	22,9	35,4	7,0
0,8	0,050	16,4	12,1	21,5	10,5
1,0	0,050	20,0	28,2	20,0	14,0
1,5	0,050	25,7	37,5	29,2	17,5

подібної кукурудзи, як більш економічний варіант. За необхідності знизити масу 1 м<sup>2</sup> паперу при збереженні його механічної міцності рекомендовано крохмаль зі ступенем заміщення 0,042, з витратою 1 %. Крохмалі воскової кукурудзи є більш прива-

ливими з точки зору стабільності готових клеїв і нижчих тепловитрат на варіння. У подальшому планується провести аналогічні дослідження з крохмалю іншого походження, насамперед, з пшеничним і картопляним.

## Список літератури:

1. Астратов М.С., Гомеля М.Д., Мовчанюк О.М. Технологія переробки паперу та картону: навчальний посібник. ч. 1. Київ.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 270 с.
2. Мовчанюк О. М. Вплив температури води на швидкість просочення відходів пакування Пюр-Пак. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2022. Т. 33 (72). № 5. С. 266–269. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/40>
3. Мовчанюк О. М., Остапенко А. А. Проклеювання паперу та картону [Електронний ресурс] : Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 120 с.
4. Chen G, Zhu P H, Kuang Y D, Liu Y, Lin D H, Peng C X, Wen Z C, Fang Z Q. Durable superhydrophobic paper enabled by surface sizing of starch-based composite films. *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 409. P. 45–51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.02.201>
5. Wei Q, Zheng H, Zhu M, et al. Starch-based Surface-sizing Agents in Paper Industry: An Overview. *Paper and Biomaterials*. 2021. Vol. 6. №4. P. 54–61. DOI: 10.1213/j.issn.2096-2355.2021.04.007
6. Vanier N L, Halal S, Dias A, Zavareze E. Molecular structure, functionality and applications of oxidized starches: A review. *Food Chemistry*. 2017. Vol. 221. P.1546–1559. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.138>
7. Wang S Q, Zhang J L, Wu G Q. Experiment on wheat starch modification and its application as paper surface sizing agent. *China Pulp & Paper Industry*. 2013. Vol. 4. P. 14–16.
8. Hubbe M. A. Size press practices and formulations affecting paper properties and process efficiency: A Review. *BioResources*. 2024. №19 (1). С. 1925–2002. DOI:10.15376/biores.19.1.Hubbe
9. ДСТУ 3500:2019. Макулатура паперова і картонна. Технічні умови. Київ, 2019. 14 с. ДСТУ 3500:2009.
10. Zhao M X, Bao Y L, Liu P L. Progress in research on fine microstructure of starch granules. *Food Science*. 2018. Vol. 39 (11), 284–294.
11. ДСТУ 7798:2021 Папір для гофрування. Технічні умови. Київ, 2022. 17 с. ДСТУ 7798:2015.

**Movchaniuk O.M., Ostapenko A.A. INCREASING THE STRENGTH OF PAPER FOR CORRUGATING FROM SECONDARY FIBER WITH CORN STARCH**

*The article is devoted to the actual problem of increasing the mechanical strength of paper for corrugating from secondary fiber. For this, the starches of tooth-shaped corn, which has a huge volume of world production, are most often used. Waxy corn is also used to make paper.*

*The purpose of study was to evaluate the influence of consumption and the degree of substitution of starch of tooth-like and waxy corn for sizing in mass on the mechanical parameters of paper for corrugating from waste paper:*

*Waste paper of the MS-5B-2 brand, which is widely used in the production of paper for corrugating, as well as modified corn starches with different values of the degree of substitution from 0.035 to 0.053 were chosen for the study. Starch consumption varied from 0.8 to 1.5%.*

*The influence of starches on the mechanical strength indicators of laboratory samples of paper for corrugating has been established. Rational values of consumption and degree of substitution of starches for mass sizing of paper for corrugating in order to achieve maximum indicators of its mechanical strength are proposed. If it is necessary to improve the grade of paper from grade B-3 to B-2, it is suggested to apply the minimum of the studied values of consumption and degree of substitution (0.8% and 0.035, respectively) of starch of tooth-like corn, as a more economical option. If it is necessary to reduce the mass of 1 m<sup>2</sup> of paper while maintaining its mechanical strength, it is necessary to use starch with a degree of substitution of 0.042 and increase the consumption to 1%.*

*The obtained results will help to increase resource efficiency in the production of waste paper for corrugation, to choose the most effective and economical starch for sizing of paper in mass. In the future, it is planned to conduct similar studies with starches of other origins, primarily wheat and potato starches.*

**Key words:** waste paper, modified corn starch, consumption, degree of substitution, paper for corrugating, mechanical strength.

УДК 355.58.001

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/09>**Семичаєвський С.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Присяжнюк В.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Володченко М.А.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

## ПРО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ЗБЕРІГАННЯ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ

У статті розкрито основні питання щодо забезпечення якості зберігання засобів індивідуального захисту.

З'ясовано, що заходи колективного захисту, що охоплюють кількість працівників на робочому місці, повинні мати пріоритет над заходами захисту, що застосовуються до окремих працівників.

Визначено мету, для якої існують засоби індивідуального захисту, а саме: виключення або суттєве зменшення впливу на працівника наявних на робочому місці небезпечних і шкідливих виробничих чинників.

Розглянуто зовнішній вигляд деяких засобів індивідуального захисту.

Досліджено основні принципи забезпечення якості зберігання засобів індивідуального захисту.

Розглянуто основні нормативні документи, які регламентують вимоги щодо якості зберігання засобів індивідуального захисту.

Розглянуто класифікацію засобів індивідуального захисту згідно з національними нормативними документами.

З'ясовано, що зберігання засобів індивідуального захисту – це питання, яке потребує особливої уваги, оскільки його неправильне виконання може знизити ефективність захисного обладнання і навіть загрожувати здоров'ю працівників.

З'ясовано, що розуміння термінів придатності засобів індивідуального захисту має вирішальне значення, оскільки ці дати вказують на максимальний термін служби обладнання за ідеальних умов.

Розглянуто приклади зберігання засобів індивідуального захисту, в тому числі за кордоном на прикладі Австралійського Союзу та Великобританії.

Розкрито питання випробування засобів індивідуального захисту органів дихання – фільтруючих протигазів. З'ясовано, що випробування засобів індивідуального захисту органів дихання - фільтруючих протигазів має проводитися кваліфікованим персоналом згідно з встановленими процедурами та регулярним графіком.

З'ясовано, що важливим заходом є навчання персоналу правилам зберігання засобів індивідуального захисту та усвідомлення ними значущості цих питань.

Визначено проблемні питання щодо зберігання засобів індивідуального захисту. З'ясовано, що ці недоліки зменшують ефективність та якість зберігання вказаних засобів.

**Ключові слова:** засоби індивідуального захисту, зберігання, ефективність, якість.

**Постановка проблеми.** У побутових умовах і на робочому місці людина нерідко стикається з ситуаціями, в яких необхідно захищати своє життя або здоров'я від впливу небезпечних факторів або отруйних речовин.

Безпека та здоров'я працівників повинні бути насамперед захищені заходами щодо усунення ризиків на робочому місці в джерелі, за допомогою технічних або організаційних засобів (наприклад, шляхом заміни небезпечних хімікатів) або

шляхом забезпечення захисту на колективній основі (наприклад, надання риштувань замість ременів).

Заходи колективного захисту, що охоплюють кількість працівників на робочому місці, повинні мати пріоритет над заходами захисту, що застосовуються до окремих працівників.

При цьому основний принцип полягає в тому, що засоби індивідуального захисту (далі – ЗІЗ) слід використовувати лише в крайньому випадку.

Якщо вищевказаних заходів недостатньо, лише тоді слід використовувати ЗІЗ для захисту від небезпек, яких неможливо уникнути.

Чому ЗІЗ слід використовувати лише в крайньому випадку? ЗІЗ має свої обмеження, оскільки:

- ЗІЗ захищає лише того, хто його носить;
- теоретичний рівень захисту рідко досягається на практиці;
- використання ЗІЗ завжди певною мірою обмежує користувача;
- психологічний ефект ЗІЗ може бути таким, що особа, яка носить ЗІЗ, відчуває себе більш захищеною, ніж вона є насправді.

Якщо ЗІЗ не працюють, особа, яка їх носить, наражається на ризик, оскільки це єдиний (або останній) захист, який має власник від конкретної небезпеки.

Метою ЗІЗ є виключення або суттєве зменшення впливу на працівника наявних на робочому місці небезпечних і шкідливих виробничих чинників.

Згідно з національним стандартом ДСТУ 7239:2011 [1] ЗІЗ – це спорядження, призначене для носіння користувачем та/або забезпечення його захисту від однієї або кількох видів небезпеки для життя чи здоров'я.

На рисунку 1 показано зовнішній вигляд деяких видів ЗІЗ.



Рис. 1. Зовнішній вигляд деяких видів ЗІЗ

До ЗІЗ належать:

- поєднання кількох видів пристосування чи спорядження, призначених для забезпечення захисту користувача від одного чи кількох видів потенційного (одночасного) ризику;

– захисне пристосування чи спорядження, призначене для носіння користувачем або забезпечення його захисту та є частиною або його використовують разом з іншим обладнанням;

- змінні комплекти ЗІЗ, необхідні для їх нормального функціонування та їх використовують лише для таких ЗІЗ.

У ДСТУ 7239:2011 [1] наведено таку класифікацію ЗІЗ, а саме:

– засоби захисту голови (захисні каски, захисні шоломи та підшоломники, капелюхи, кепі, кепки з захистом і без, шапки, берети, косинки, сітки для волосся – з козирком і без, накомарники);

– засоби захисту органів слуху (вкладки для вух та аналогічні засоби (протишумові вкладки)), звукозахисні шоломи, протишумові навушники, протишумові навушники, які можна кріпити до касок і шоломів, протишумові захисні пристрої з електронним приймачем, протишумові захисні пристрої з телефонним зв'язком;

– засоби захисту очей і обличчя (захисні окуляри, зокрема зі світлофільтрами, захисні окуляри від рентгенівського, лазерного, ультрафіолетового, інфрачервоного випромінювання та від яскравого світла, екрани для обличчя, захисні окуляри та екрани від механічних ушкоджень, пилу, бризок, хімічних речовин тощо, маски та щитки для дугового зварювання);

– засоби захисту органів дихання (фільтрувальні пристрої, ізолювальні пристрої, засоби захисту органів дихання зі знімною маскою зварника);

– засоби захисту рук, плеча та передпліччя (захисні рукавиці, захисні рукавички, безпальчикові рукавички, напальнички, надолонники, нарукавники, налокітники, наплічники, антиелектростатичні браслети і кільця, назап'яски для важкої праці);

– одяг спеціальний захисний (спецодяг);

– засоби захисту ніг та стегон;

– засоби захисту від падіння з висоти;

– засоби захисту комплексні.

До ЗІЗ висувають високі вимоги щодо їхньої ефективності, надійності, якості та економічності.

Одним із важливих факторів, які впливають на якість, надійність та ефективність ЗІЗ є забезпечення їх якісного зберігання. Для ЗІЗ якість і надійність є релевантними характеристиками, тому що ушкодження цих виробів внаслідок, зокрема, неналежного зберігання може призвести до втрати захисних властивостей ЗІЗ і зумовити виникнення професійних захворювань або травм.



Враховуючи вищенаведене, проблема забезпечення якості зберігання ЗІЗ є на теперішній час актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Публікація [2] присвячена аналізу конструктивних особливостей сучасних засобів індивідуального захисту органів дихання фільтруючого типу.

В публікації [3] досліджено питання експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання фільтруючого типу.

В той же час, слід зауважити, що у цих публікаціях не розглянуто питання, що стосуються якості зберігання ЗІЗ.

**Постановка завдання.** Метою статті є сприяння у вирішенні проблеми забезпечення якості зберігання ЗІЗ. Для вирішення зазначеної проблеми у цій публікації необхідно проаналізувати основні принципи забезпечення якості зберігання ЗІЗ та вказати основні проблемні питання.

#### **Виклад основного матеріалу.**

**Аналіз основних принципів забезпечення якості зберігання ЗІЗ.** Основні вимоги щодо якості зберігання ЗІЗ викладені у Технічному регламенті [4]. Технічний регламент розроблено на основі Регламенту Європейського Парламенту і Ради (ЄС) №2016/425 від 9 березня 2016 року про засоби індивідуального захисту та скасування Директиви Ради 89/686/ЄЕС.

Кожен ЗІЗ повинен забезпечувати належний ступінь захисту від небезпеки і мати таку конструкцію, що у передбачуваних умовах експлуатації максимально захистить користувача.

Слід відмітити, що останнім часом спостерігається підвищення рівня безпеки на робочому місці, в чому ЗІЗ відіграють ключову роль. ЗІЗ включають широкий спектр обладнання, від простих окулярів захисту до складних систем дихального захисту. При правильному використанні та зберіганні вони можуть значно знизити ризик травм та захворювань на робочому місці.

Зберігання ЗІЗ – це питання, яке потребує особливої уваги, оскільки його неправильне виконання може знизити ефективність захисного обладнання і навіть загрожувати здоров'ю працівників. Для забезпечення якісного збереження захисних, експлуатаційних і гігієнічних властивостей ЗІЗ, протягом нормативного строку на підприємствах повинен застосовуватися комплекс заходів щодо догляду за ними: сушіння, знепилення, прання, хімічистка, поновлення просочень, дезинфекція, миття, ремонт, волого-теплова обробка тощо.

У разі надання ЗІЗ на ринку розповсюджувачі повинні діяти згідно з вимогами Технічного регламенту [4].

Розповсюджувачі повинні забезпечити, під час перебування під їх відповідальністю, умови зберігання чи транспортування ЗІЗ, що не ставлять під загрозу відповідність ЗІЗ суттєвим вимогам щодо безпеки та охорони здоров'я визначеним у додатку II до Технічного регламенту [4].

Стандарт ОСТ 64-028-87 [5] поширюється на ЗІЗ та встановлює порядок забезпечення, вибору, експлуатації, а також правила зберігання і уходу за ЗІЗ. Для зберігання ЗІЗ, виданим робочим та службовцям мають бути обладнані спеціальні приміщення (гардеробні, респіраторні тощо). В гардеробних має бути передбачено шафи (відкриті чи закриті) з відділеннями для спецодягу, головних уборів та інших ЗІЗ.

За необхідності зберігання декількох видів спецодягу, шафи мають бути обладнані пересувними перегородками. Забороняється зберігати ЗІЗ разом з особистим одягом. У виробничих приміщеннях, пов'язаних із впливом вологи, начальник цеха зобов'язаний організувати в гардеробних пристрої для сушіння ЗІЗ.

У виробництві із впливом на працівників речовин 1-го та 2-го класів небезпеки для зберігання спецодягу мають бути передбачені шафи із примусовою вентиляцією. Для зберігання протигазів у цеху має бути виділено спеціальне місце.

У кожному пожежо- і вибухонебезпечному цеху, у входа необхідно зберігати необхідну кількість аварійних комплектів ЗІЗ.

Згідно з ОСТ 64-028-87 [5] якість зберігання ЗІЗ полягає у оптимальному розміщенні ЗІЗ у приміщенні зберігання. ЗІЗ необхідно складати таким чином, щоб забезпечити легкий доступ до них та одночасно уникати пошкоджень. Вони мають бути чітко розміщені та згруповані за типом або використанням. Важливо уникати складування ЗІЗ безпосередньо поблизу джерел тепла, прямого сонячного світла або вологості, що може призвести до їх деградації.

Правильне зберігання також має вирішальне значення для предметів, які могли контактувати з небезпечними матеріалами. Забезпечення правильного зберігання цих предметів запобігає забрудненню ними іншого обладнання чи зон, підтримуючи безпечне та здорове середовище для всіх працівників.

ЗІЗ повинні зберігатися в чистому, сухому і добре провітрюваному приміщенні. Це забезпечує збереження матеріалів і унеможливорює виникнення цвілі або корозії. Важливо регулярно проводити прибирання приміщення зберігання, видаляти пил та бруд. Вологість повинна контролюватися.

люватися та підтримуватися в межах допустимих норм, що особливо важливо для ЗІЗ із текстильних матеріалів.

Під час зберігання ЗІЗ також мають значення конкретні інструкції виробника, які додаються до багатьох предметів ЗІЗ. У них чітко викладені інструкції щодо зберігання, яких ви повинні дотримуватися.

Знову ж таки, м'яке мило та вода – найкращий спосіб очистити вашу каску; однак, якщо у вас виникли труднощі з видаленням речовини з якоїсь частини каски, вам слід замінити цей компонент.

Такі фактори, як контроль температури, рівень вологості та загальна чистота, відіграють важливу роль у підтримці цілісності обладнання. Організація також має ключове значення – виділені місця для зберігання з чіткими ярликами допомагають підтримувати ЗІЗ у порядку та легкодоступні.

Правильне зберігання ЗІЗ має важливе значення для довговічності предметів. Неправильне зберігання або технічне обслуговування може значно скоротити термін служби ЗІЗ, спричиняючи його старіння, що значно перевищує очікуваний термін служби. Це не тільки призводить до частої заміни, але й ставить під загрозу безпеку тих, хто носить обладнання. Забезпечуючи правильне зберігання та обслуговування вашого обладнання, ви можете запобігти передчасному зносу, продовжити термін його використання та гарантувати, що воно продовжує забезпечувати надійний захист.

Важливою частиною технічного обслуговування є необхідність постійного огляду ЗІЗ. Постійні перевірки допомагають виявити пошкоджені або несправні ЗІЗ перед їх використанням. Використання погано обслуговуваних або несправних ЗІЗ іноді може бути більш небезпечним, ніж відсутність будь-яких засобів захисту взагалі. Працівники отримують помилкове відчуття безпеки і думають, що вони захищені, хоча насправді це не так.

ЗІЗ не можна знімати з робочого місця або з приміщень, де використовується обладнання, за винятком цілей очищення, ремонту, технічного обслуговування, модифікації, ремонту або заміни. Таким чином, для ситуацій, коли вони не використовуються, слід забезпечити відповідні приміщення для зберігання ЗІЗ. Якщо ЗІЗ можуть бути забруднені під час використання, зберігання повинно бути окремим від будь-якого місця зберігання звичайного одягу.

Термін служби ЗІЗ залежить від типу обладнання та способу його використання, зберігання та обслуговування. В ідеалі робоче взуття має прослужити 6–12 місяців на роботі, каски та навушники мають прослужити до 3 років у оригінальній упаковці та до 3 років на робочому місці, а одяг з високою видимістю зазвичай служить приблизно 6 місяців із регулярним використанням. Однак на

цю тривалість значною мірою впливають належні методи обслуговування та зберігання. Без відповідного догляду фактичний термін служби цих предметів може значно зменшитися.

Розуміння термінів придатності ЗІЗ має вирішальне значення. Ці дати вказують на максимальний термін служби обладнання за ідеальних умов, не обов'язково дату заміни. Без належного догляду та зберігання ЗІЗ, можливо, доведеться замінити набагато раніше, і якщо ви цього не знаєте, ви можете поставити під загрозу безпеку. Дотримання правил зберігання гарантує, що ЗІЗ залишатимуться ефективними до закінчення терміну придатності.

На рисунку 2 наведено приклад зберігання деяких ЗІЗ.



Рис. 2. Приклад зберігання деяких ЗІЗ

На рисунку 3 наведено приклад зберігання ЗІЗ у Великобританії. Використання ящиків для зберігання ЗІЗ дозволяє підтримувати засоби безпеки у робочому стані. Пилозахисний гумовий ущільнювач допомагає підтримувати ЗІЗ в чистоті. Вікно з полікарбонату дозволяє легко ідентифікувати ЗІЗ.



Рис. 3. Приклад зберігання ЗІЗ у Великобританії

На рисунку 4 наведено приклад зберігання ЗІЗ в Австралійському Союзі.



Рис. 4. Приклад зберігання ЗІЗ в Австралійському Союзі

Для кожного виду ЗІЗ необхідно знати його термін придатності та термін використання. ЗІЗ зі строком придатності або використання, що минув, не можуть забезпечити належний захист і повинні бути утилізовані. Важливо вести облік та контроль термінів зберігання та використання ЗІЗ.

Укомплектованість ЗІЗ повинна забезпечувати їхню безпеку та захищати від пошкоджень, забруднень та зовнішнього впливу. ЗІЗ повинні зберігатися укомплектовано (в оригінальній упаковці) до моменту їх використання. Якщо упаковка пошкоджена, ЗІЗ слід переупакувати або використовувати насамперед. При цьому упаковка не повинна перешкоджати доступу до ЗІЗ при необхідності швидкого використання.

Усі ЗІЗ органів дихання від небезпечних хімічних речовин (далі – ЗІЗ ОД) мають зберігатися у чистому зібраному вигляді.

Дозволяється розбирати ЗІЗ ОД на нетривалий час для проведення технічного обслуговування та сушіння.

Респиратори мають зберігатися в герметичних поліетиленових пакетах.

Не допускається зберігання засобів радіаційного та хімічного захисту поруч із горючими речовинами, кислотами, лугами та іншими агресивними речовинами.

На рисунку 4 наведено ЗІЗ органів дихання – фільтруючі протигази (далі – ЗІЗ ОД-ФП), які призначені для захисту від небезпечних хімічних речовин. Вказані ЗІЗ ОД-ФП повинні бути збережені у чистому зібраному вигляді.

Розбирання ЗІЗ ОД-ФП на короткий період допускається для технічного обслуговування та сушіння.

Відповідно до Технічного регламенту [4], якщо ЗІЗ є фільтрувальним засобом інструкції виробника мають вказувати строки (терміни зберігання



Рис. 5. ЗІЗ органів дихання - фільтруючі протигази (ЗІЗ ОД-ФП)

нових фільтрів у їхньому оригінальному пакуванні та нормативний термін захисту (використання) фільтра у днях, годинах, змінах (обов'язково вказавши кількість годин однієї зміни).

Респиратори мають бути зберігатися в герметичних поліетиленових пакетах.

Не дозволяється зберігання засобів радіаційного та хімічного захисту поруч з горючими речовинами, кислотами, лугами та іншими агресивними речовинами.

На лівому боці сумки, де зберігається ЗІЗ ОД, яке використовує працівник, пришивається спеціальна бирка розміром 3 × 5 см з номером ЗІЗ ОД, прізвищем та ініціалами користувача.

Особи, що зайняті в оповіщенні, аварійно-рятувальних та інших невідкладних роботах, локалізації та ліквідації аварійних ситуацій та аварій, ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру, повинні мати ЗІЗ ОД з переговорним пристроєм.

Важливим заходом є навчання персоналу правилам зберігання ЗІЗ та усвідомлення ними значущості цих питань. Тільки тоді можна гарантувати, що засоби захисту будуть виконувати свою функцію, коли це дійсно потрібно.

Вищенаведені ЗІЗ ОД повинні періодично піддаватися випробуванням для забезпечення їхньої ефективності та безпеки. Випробування ЗІЗ ОД проводять з метою перевірки їхньої герметичності, функціональності та відповідності вимогам стандартів.

Залежно від типу ЗІЗ ОД, випробування може включати такі етапи:

– герметичність: перевіряється стан прокладок, клапанів та інших елементів, що забезпечують герметичність ЗІЗ ОД. Це може включати тестування за допомогою спеціальних пристроїв або

методів, таких як перевірка наявності протікання повітря;

– функціональність: перевіряється правильне функціонування всіх компонентів ЗІЗ ОД, зокрема клапанів вдиху та видиху, фільтрів та інших механізмів. Це може включати тестування роботи клапанів, повітрязабезпечення та регулювання потоку повітря;

– відповідність стандартам: ЗІЗ ОД повинні відповідати встановленим стандартам безпеки та якості. Під час випробовування перевіряється, чи задовольняють ЗІЗ ОД вимогам стандартів, які можуть включати фільтраційну ефективність, стійкість до хімічних речовин, опір диханню та інші характеристики.

Випробування ЗІЗ ОД-ФП має проводити кваліфікований персонал згідно з встановленими процедурами та регулярним графіком. Результати випробовувань слід документувати для забезпечення слідування вимогам.

У всіх випадках важливо стежити за станом ЗІЗ, регулярно проводити їх інспекцію та у разі виявлення пошкоджень або закінчення терміну придатності негайно їх замінити.

Правильне та якісне зберігання ЗІЗ є важливою частиною управління безпекою на робочому місці. Необхідно приділяти увагу не тільки вибору та використанню засобів захисту, але і їх зберіганню, щоб забезпечити максимальну ефективність та довговічність.

В той же час, виникає багато проблем щодо зберігання ЗІЗ, а саме:

- недотримання інструкцій, технічної документації та нормативних документів щодо зберігання ЗІЗ;
- відсутність спеціально обладнаних приміщень, складів, гардеробних для ЗІЗ;
- закінчення терміну придатності ЗІЗ;
- зношування ЗІЗ;
- неукomплектованість ЗІЗ;

– відсутність кваліфікованого персоналу у відповідній організації, установі;

– несвоєчасне проведення лабораторних випробувань для перевірки якості ЗІЗ;

– відсутність вентиляції або опалення у складських приміщеннях;

– відсутність додаткових шафів, які повинні бути зачинені або відкриті для спеціального робочого одягу, головних уборів тощо.

Наведені вище недоліки зменшують ефективність та якість зберігання ЗІЗ.

Зберігання ЗІЗ має відповідати наступним основним умовам:

– спеціальний одяг з прогумованих тканин та гумове взуття слід зберігати в затемнених приміщеннях (шафах, контейнерах) за температури від 5°C до 20°C та відносної вологості повітря 50–70%;

– ЗІЗ мають бути захищені від прямого попадання сонячних променів та спрямованої дії джерел тепла;

– забороняється зберігання ЗІЗ у приміщенні разом з кислотами, лугами, розчинниками, бензином, маслами та іншими матеріалами, що можуть бути джерелом шкідливих речовин.

В окремих випадках там, де за умовами роботи вказаний порядок зберігання спеціального одягу, спеціального взуття та інших ЗІЗ не може бути застосований (на лісозаготівлях, геологорозвідвальних роботах тощо), вони можуть залишатися в неробочий час у працівників, що повинно бути обумовлено в колективному договорі чи в правилах внутрішнього трудового розпорядку підприємства.

**Висновки.** У даному дослідженні виявлено основні принципи забезпечення якості зберігання ЗІЗ. Виявлено причини щодо неякісного зберігання ЗІЗ.

Проблема забезпечення якості зберігання ЗІЗ залишається актуальною та потребує проведення подальших досліджень.

#### Список літератури:

1. ДСТУ 7239:2011. Система стандартів безпека праці засоби індивідуального захисту. Загальні вимоги та класифікація. – Введ. 2011-08-01. – К.: Держспоживстандарт України, 2011. – 10 с.
2. Володченко М.А., Семичаєвський С.В., Присяжнюк В.В. Щодо сучасних засобів індивідуального захисту органів дихання фільтруючого типу: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених «Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту», м. Харків, Національний університет цивільного захисту України, 2024. – С. 511.
3. Сергій Семичаєвський, Марина Володченко, Вікторія Хоменко Актуальні питання експлуатації засобів індивідуального захисту органів дихання фільтруючого типу: Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції: «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій», м. Черкаси, АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2024. – С. 46–47.
4. Технічний регламент засобів індивідуального захисту, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 21 серпня 2019 року №771.
5. ДНАОП 1.9.10-2.07-87. (ОСТ 64-028-87). Порядок забезпечення робітників та службовців засобами індивідуального захисту. Вибір, експлуатація та догляд за ними. – Введ. 1987-07-01, 1987.

**Semychaievskiy S.V., Prysiazhniuk V.V., Volodchenko M.A. ON QUALITY ASSURANCE OF STORAGE OF INDIVIDUAL PROTECTION EQUIPMENT**

*The article discusses the main issues related to ensuring the quality of storage of personal protective equipment.*

*It is clear that collective protection measures covering the number of workers in a workplace should take priority over protection measures applicable to individual workers.*

*The purpose for which personal protective equipment exists is determined, namely: exclusion or significant reduction of the impact on the employee of dangerous and harmful production factors present at the workplace.*

*The exterior appearance of some personal protective equipment was considered.*

*The main principles of ensuring the quality of storage of personal protective equipment were studied.*

*The main regulatory documents that regulate the requirements for the quality of storage of personal protective equipment are considered.*

*The classification of personal protective equipment in accordance with national regulatory documents is considered.*

*It was found that the storage of personal protective equipment is an issue that requires special attention, since its incorrect implementation can reduce the effectiveness of protective equipment and even endanger the health of workers.*

*It has been found that understanding the expiration dates of personal protective equipment is critical, as these dates indicate the equipment's maximum life under ideal conditions.*

*Examples of storage of personal protective equipment are considered, including abroad on the example of the Australian Union and Great Britain.*

*The issue of testing personal protective equipment for respiratory organs - filtering gas masks - has been revealed. It was found that the testing of personal protective equipment for respiratory organs - filtering gas masks should be carried out by qualified personnel in accordance with established procedures and a regular schedule.*

*It was found that an important measure is the training of personnel on the rules for storing personal protective equipment and their awareness of the importance of these issues.*

*Problematic issues regarding the storage of personal protective equipment have been identified. It was found that these shortcomings reduce the efficiency and quality of storage of the indicated means.*

**Key words:** *efficiency, personal protective equipment, quality, storage.*

УДК 620.3: 66.061.34 + 543.9  
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/10>

**Скиба М.І.**

ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»  
Українського державного університету науки та технологій

**Скиба Ю.М.**

ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»  
Українського державного університету науки та технологій

**Залуужний Д.С.**

ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»  
Українського державного університету науки та технологій

**Воробйова В.І.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ВПЛИВ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ ДІОКСИДУ ТИТАНУ НАНОСРІБЛОМ НА ФОТОКАТАЛІТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ: ДЕГРАДАЦІЯ ТЕТРАЦИКЛІНУ ГІДРОХЛОРИДУ

Фармацевтичні сполуки відносяться до категорії «нові забруднювачі/«emerging pollutants»» забруднювачами водних ресурсів через їх широке використання в медичних цілях, що призводить до виходу цих сполук у високих концентраціях у фармацевтичні та лікарняні стічні води. У статті представлено характеристику модифікованих наносріблом зразків діоксиду титану: Ag НЧ з середнім розміром  $d_{cp}=10-32$  нм розташовані на поверхні модифікованого титан (IV) оксиду несучильною структурою. Одержані композити зберігають оптичні властивості метала-модифікатора – мають типову смугу поглинання у видимому діапазоні при  $\lambda=420-424$  нм, що відповідає смугі поверхневого плазмонного резонансу НЧ срібла. Встановлено, що введення металу-допantu забезпечує передумови підвищення фотокаталітичної активності – зменшення ширини забороненої зони композиту з 3,0–3,5 eV до 2,6–2,7 eV. Досліджено фотокаталітичну активність при УФ-опроміненні комерційного зразка діоксиду титану, поверхню якого модифіковано наночастинками срібла плазмохімічним способом. Продемонстровано, що зразки  $TiO_2/AgHCl$  характеризуються вищою ефективністю фотодеградації до тетрацикліну порівняно з немодифікованим зразком  $TiO_2$  завдяки ефекту поверхневого плазмонного резонансу наночастинок срібла. Встановлено вплив ряду параметрів фотокаталітичного процесу деградації тетрацикліну: концентрація антибіотика тетрацикліну гідро хлориду, 5–100 мг/л, тривалість фотодеградації  $\tau=10-120$  хв., тину УФ-опромінення ( $\lambda=274-365$  нм), концентрація фотокаталізатора 0,6–1,2 г/л, значення рН розчину (3–10) на ефективність деградації тетрацикліну та константу розкладання тетрацикліну гідрохлориду. Продемонстровано, що розкладання ТЦ описується реакцією псевдо першого порядку з розрахованим значенням  $k=0,0028-0,02$  хв<sup>-1</sup>. Встановлено закономірність збільшення ефективності деструкції ТЦ при збільшенні тривалості опромінення, лужності розчину до рН=8–10 та зменшенні концентрації вихідного розчину до 10–20 мг/л.

**Ключові слова:** модифікація, фотокаталізатор, антибіотик, окиснення, тетрациклін.

**Постановка проблеми.** Категорія поллютантів «нові забруднювачі»/«emerging pollutants» – це виявлені забруднювачі або забруднюючі речовини, що викликають занепокоєння, спричинені діяльністю людини, яка становить загрозу навколишньому середовищу або здоров'ю людей, але щодо яких ще не застосовуються інші екологічні норми [1, 2]. Категорія «нові забруднювачі» в основному включають ліки, фармацевтичні препарати та засоби особистої гігієни. Стічні води виробництва антибіотиків містять високі концентрації залиш-

кових антибіотиків, а очищені стічні води в ряді аналітичних звітів визначені як важливе точкове джерело забруднення навколишнього середовища антибіотиками [1–4]. Зростання забруднення довкілля фізіологічно активними сполуками, що містяться у фармацевтичних препаратах/ліках, викликає значну занепокоєність через їх вплив на здоров'я людини та стан водних ресурсів, оскільки більшість з цих сполук є стійкими до біологічного розкладання та традиційних методів очищення/деградації у водному середовищі [1].

Серед широкого переліку фармацевтичних препаратів/ліків, у всьому світі різко в період 2020–2022 років зросло споживання антибіотиків [3, 4]. Відтак, серед різноманітних антибіотиків тетрациклін займає друге місце за поширеністю, оскільки використовується в медицині, ветеринарії, а також при профілактиці та контролі хвороб тварин і рослин [3, 4]. В даний час відоме застосування ряду методів в обробці стічних вод для видалення/деградації фармацевтичних препаратів/ліків [5, 6] (попереднє хлорування, флокуляція, коагуляція, флотажія, ультразвукова обробка, біологічна обробка, хімічне окислення, адсорбція, гамма-опромінення, мембранна фільтрація та озонування). Проте, слід зазначити, що за різними оцінками авторів [2–7] ефективність цих методів для видалення антибіотика ТЦ становить на рівні 30–50%. Тому розробка нових методів та удосконалення вже відомих традиційних способів видалення/деградації/окиснення категорії полутантів «нові забруднювачі/emerging pollutants» є актуальним та своєчасним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Гетерогенний фотокаталіз, як представник категорії передових окисних процесів, вже довів свою ефективність для розкладання широкого переліку забруднюючих речовин, в тому числі і антибіотиків [1–7]. Фотокаталітична активність діоксид титану  $TiO_2$  досліджена, як в ультрафіолетовій так УФ-видимій області до розкладання ряду антибіотиків та форматевтичних препаратів (тетрациклін, ібупрофен тощо) [5–7, 8]. Для покращення фотокаталітичної активності наразі використовують різні способи модифікації напівпровідників металами та неметалами [1, 3, 5–7]. Серед наноматеріалів наночастинки срібла ( $Ag$  НЧ) є найпоширенішими для модифікування діоксид титану, що зумовлено їх вираженим локалізованим поверхневим плазмонним резонансом. Аналіз літературних джерел [2, 4, 5–8] свідчить, що допування напівпровідника  $TiO_2$  наночастинками срібла є ефективною стратегією і дозволяє розширити його фотокаталітичну активність в діапазон видимого світла, зменшити ймовірність рекомбінації електрон-діркових пар за рахунок створення бар'єру Шотткі на межі розділу з  $TiO_2$ , що виступає пасткою для електронів, та, дотогож, покращити його антибактеріальні властивостей. Також наразі встановлено, що ефективність фотокаталізатора залежить при цьому від ряду факторів, що обумовлено способом модифікації «insute», способом формування наночастинок срібла/типом відновника/стабілізатора та їх розмірних характеристик. В попе-

редніх роботах представлено дослідження фото каталітичної деструкції тетрацикліну діоксид титаном, модифікованим наночастинками срібла плазмохімічним способом, при використанні різних типів стабілізаторів (карбоксиметил целюлоза, цитрат) і продемонстровано його ефективність в порівнянні з не модифікованим комерційним зразком. Наразі є потреба у визначенні впливу ряду параметрів фотокаталітичної деструкції (вихідної концентрації тетрацикліну, рН розчину, інтенсивності опромінення тощо).

**Постановка завдання.** Метою роботи було визначення фотокаталітичної деградації антибіотика тетрацикліну гідрохлориду при використанні поверхнево-модифікованого наночастинками срібла діоксид титану за різних технологічних умов.

#### Виклад основного матеріалу.

##### Методика експериментальних досліджень

Модифікування діоксид титану наночастинками срібла плазмохімічним способом, здійснювали відповідно до робіт [9, 10]. Для одержання розчинів ТЦ, наважки 10–100 мг/л розчиняли у дистильованій воді та розчиняли при перемішуванні протягом 10–30 хв. Концентрацію ТЦ вимірювали за допомогою спектрометра UV-Vis в діапазоні 200–800 нм. Ефективність деградації тетрацикліну гідрохлориду було розраховано відповідно до рівняння за значенням інтенсивності спектра при  $\lambda=357$  нм:  $(A_0/A_t)/A$ , де  $A_0$  – значення поглинання початкового розчину,  $A_t$  – значення поглинання розчину в визначений період часу.

**Результати досліджень.** В попередніх роботах авторів [9–11] продемонстровано відновлення іонів срібла з водного розчину нітрату срібла шляхом його опромінення розрядом плазми за присутності  $TiO_2$  та реагента-стабілізатора, як спосіб модифікування поверхні діоксиду титану наночастинками срібла. Результати досліджень із застосуванням сучасних фізико-хімічних методів аналізу (скануюча мікроскопія, рентгенофазовий (рис. 1 а), елементний аналіз (рис. 1 б) тощо) свідчать, що в результаті дії наддрідинного розряду на систему складу «водний розчин прекурсору ( $Ag^+$ )+СТАБІЛІЗАТОР НЧ)/ $TiO_2$ » є формування наноструктури діоксиду титану складу  $TiO_2/Ag_{НЧ}$ , що представлена імпергованими НЧ на поверхні комерційних зразків титан (IV) оксиду. Результати досліджень свідчать, що в одержаному композиті НЧ розташовані на поверхні модифікованого титан (IV) оксиду несучільною структурою. При цьому, розмір НЧ на поверхні титан (IV) оксиду становить  $d_{cp}=10-32$  нм (рис. 1 а) і є близьким до тих, що характерно відповідним плазмохімічно

одержаним системам Ag з різними типами стабілізаторів [Me<sup>+</sup>/СТАБ] [9–11]. Одержані композити зберігають оптичні властивості метала-модифікатора – мають типову смугу поглинання у видимому діапазоні при  $\lambda=420\text{--}424\text{ нм}$ , що відповідає смугі лінії поверхневого плазмонного резонансу НЧ срібла.

Оптичні енергії забороненої зони матеріалів були отримані за допомогою графіків  $(\alpha h\nu)^2$  як функції  $h\nu(\Delta E)$  і показані на рис. 2. Встановлено, що введення металу-допанту в кількості 1–2 мас.% забезпечує передумови підвищення фотокаталітичної активності – зменшення ширини забороненої зони композиту з 3,0–3,5 еВ (для рутилу/анатазу) до 2,6–2,7 еВ, і не залежить від типу стабілізатора та розміру утворюваних НЧ (рис. 2).

Молекула тетрацикліну гідрохлориду має два характерні максимуми в спектрі поглинання (при  $\lambda=276$  і  $\lambda=357\text{ нм}$ ) різної інтенсивності залежно від концентрації (рис. 1) у розчині і є чутливою до УФ-опромінення [1–7].

Порівняння результатів опромінення зразка тетрацикліну 100 мг/л при використанні не модифі-

кованого зразка фотокаталізатора ступінь деградації за 100 хв. процесу становить порядка 2%, в той час як використання модифікованого діоксид титану дозволяє збільшити цей показник до 35% (рис. 4 а, б). Вплив концентрації ТЦ на ефективність деградації оцінювали, використовуючи 1,2 г/л  $\text{TiO}_2\text{AgНЧ}$  та розчини ТЦ 10–100 мг/л при значенні рН 7.

Результат впливу вихідної концентрації антибіотика на ефективність деградації представлено на рис. 4 (а–б). Ефективність фотокаталітичної деградації ТЦ знижувалася зі збільшенням концентрації ТЦ.

Як видно з рис. 5, коли початкова концентрація тетрацикліну становила 10–40 мг/л, швидкість розпаду могла досягати 60–80,24% за 1 годину. Зі збільшенням початкової концентрації тетрацикліну до 100 мг/л швидкість розпаду зменшилась до 33% за 120 хв. Також на рис. 4, 5 представлено розраховані дані константи швидкості фотокаталітичного розкладання ТЦ. Реакція відповідає псевдопершому порядку і константа швидкості розкладання становить  $0,016\text{ хв}^{-1}$  при концентрації 10 мг/л, і яка, однак, зменшилась до  $0,0075\text{ хв}^{-1}$

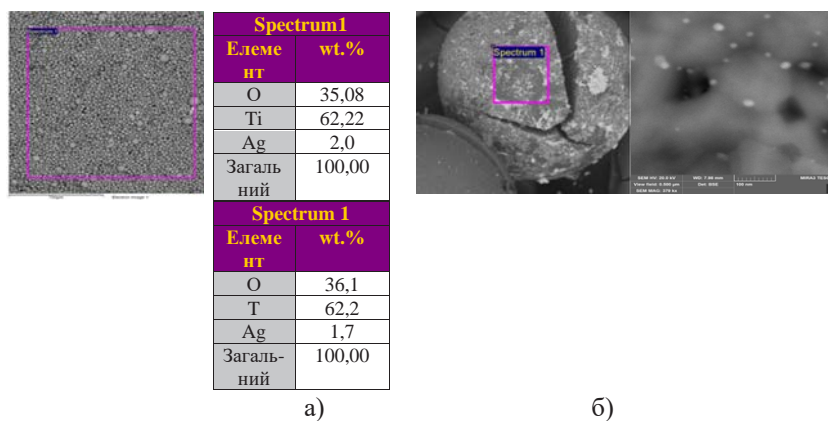


Рис. 1. Енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія (а), зображення СЕМ зразка плазмохімічно модифікованого композиту складу  $\text{TiO}_2/\text{AgНЧ}$  (б)

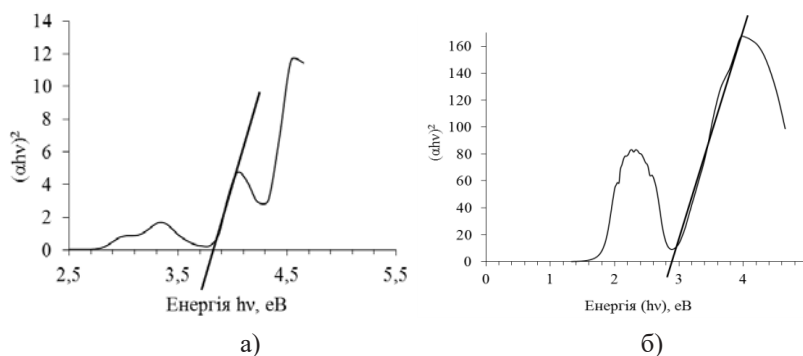


Рис. 2. Вигляд  $(\alpha h\nu)^2$  як функції  $h\nu(\Delta E)$  для метал-напівпровідникових наноструктур та значення ширини забороненої зони



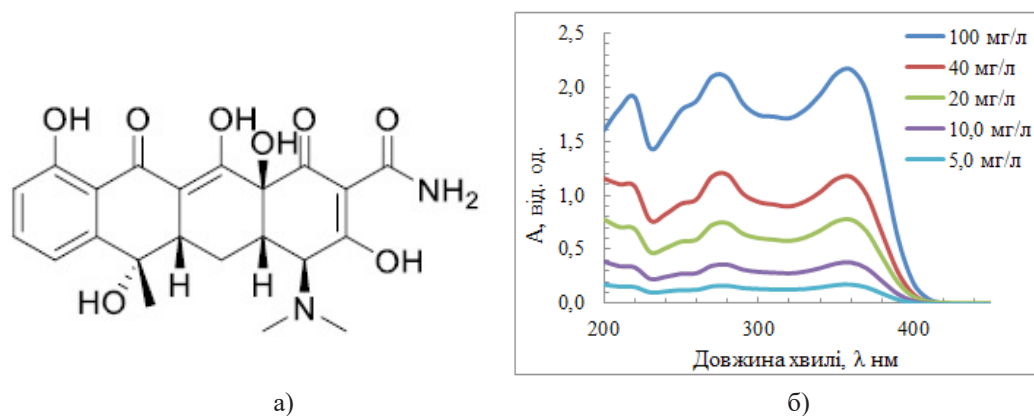
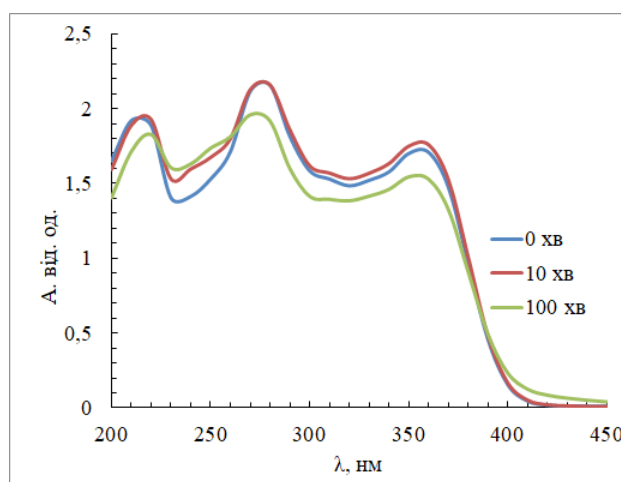
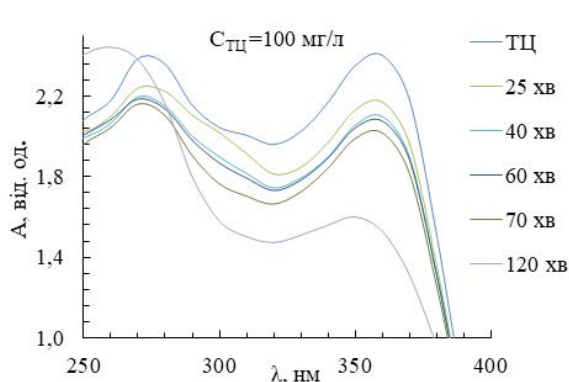


Рис. 3. Хімічна структура (а) та спектри тетрацикліну гідрохлориду залежно від концентрації в розчині (б)



а)



б)

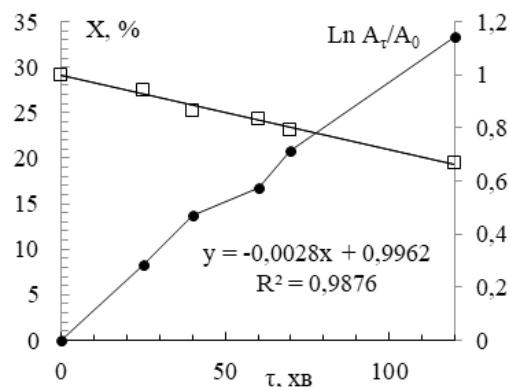
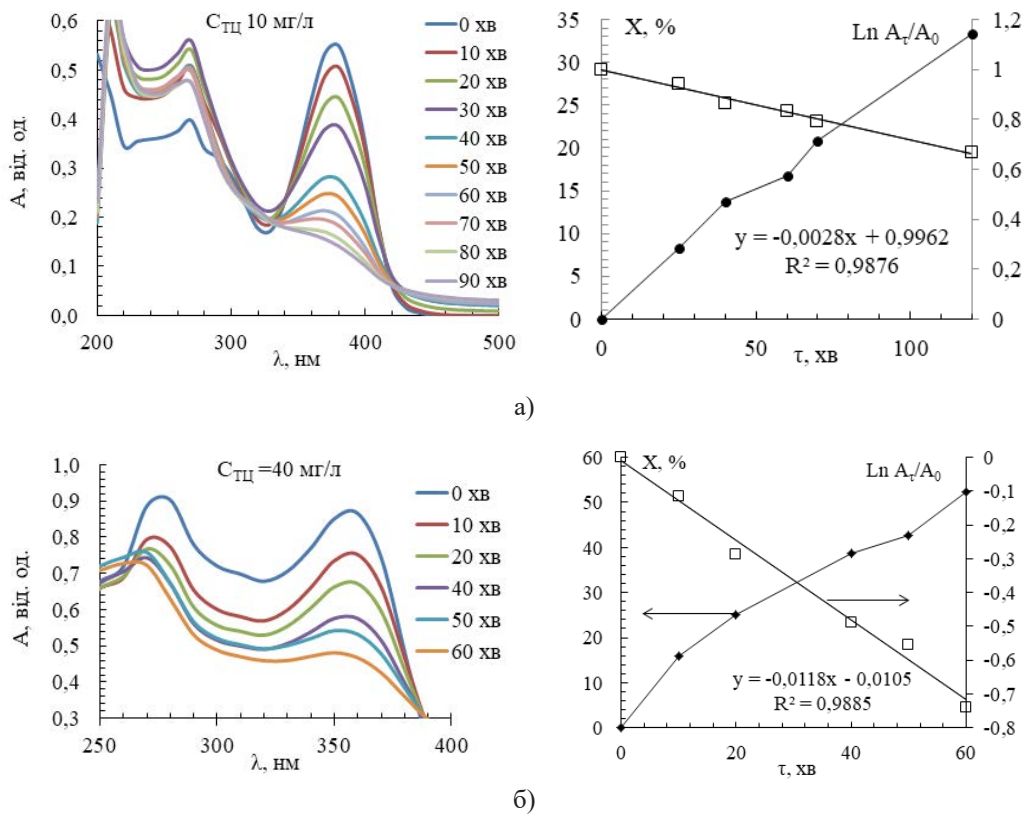


Рис. 4. Кінетика спектрів, ступінь деградації та залежності  $\text{Ln } A_t/A_0$  при фотокаталітичній деградації тетрацикліну гідрохлориду при застосуванні не модифікованого (а) та модифікованого зразків  $\text{TiO}_2/\text{Ag}$ цит (б):  $\text{УФ}=365 \text{ нм}$ ,  $100 \text{ мг/л}$  (в),  $m(\text{TiO}_2/\text{Ag}_{\text{цит}})=1,2 \text{ г/л}$

$0,0028 \text{ хв}^{-1}$  при  $40 \text{ мг/л}$  і  $100 \text{ мг/л}$  відповідно. Подібна закономірність описана і в ряді робіт, де автори причину такої закономірності пов'язують з тим, що при високих концентраціях забруднюючих речовин утворюється більше проміжних продуктів, що посилює адсорбційну конкуренцію між забруднюючою речовиною та продуктами її розпаду (про-

міжними продуктами) на поверхні каталізатора [8–9] та збільшенням довжини шляху фотонів, що входять до реакційної системи, тим самим зменшуючи кількість фотонів на поверхні каталізатора.

Крім того, оскільки іони тетрацикліну домінують в активному центрі фотокаталізатора, це призводить до зменшення кількості гідроксильних



**Рис. 5.** Кінетика спектрів, ступінь деградації та залежності  $\ln A_t/A_0$  при фотокаталітичній деградації тетрацикліну гідро хлориду різної початкової концентрації: УФ=365 нм, 10 мг/л (а), 40 мг/л (б), 100 мг/л (в),  $m(\text{TiO}_2/\text{Ag}_{\text{ннт}})=1,2$  г/л

радикалів, утворених на поверхні каталізатора, тим самим знижуючи фотокаталітичну активність. Досліджено вплив типу опромінення то реактора на фотокаталітичну деградацію тетрацикліну гідро хлориду (рис. 6).

Встановлено, що використання реактора опромінення проточного типу «Екософо» при УФ-опроміненні 274 нм дозволяє збільшити швидкість розкладання з  $0,016 \text{ хв}^{-1}$  до  $0,02 \text{ хв}^{-1}$ , що є цілком закономірним і узгоджується з рядом робіт [1, 4, 7].

Значення рН розчину є важливим фактором при оцінці фотокаталітичного розкладання тетрацикліну, оскільки рН впливає на властивості електричного заряду поверхні фотокаталізатора. Величина рН визначає стан іонізації поверхні фотокаталізатора, а потім впливає на адсорбцію та фотокаталітичну продуктивність будь-якого фотокаталізатора [1–5, 7–9].

Досліджено вплив рН розчину на константу розкладання тетрацикліну гідрохлориду (табл. 1). Ефективність фотокаталітичної деградації ТЦ в діапазоні рН 4, 7 і 10 оцінювали з використанням концентрації тетрацикліну 10 мг/л і представлені в табл. 1. Дослідження впливу рН на константу розкладання тетрацикліну гідрохлориду показує, що швидкість

розпаду значно змінюється залежно від кислотності середовища: найбільше значення константи відповідає рН=8. Ефективність фотокаталітичного розкладання ТЦ при різних значеннях рН дотримувалася порядку рН8 > рН7 > рН4. Висока швидкість фотолізу в лужному середовищі (рН=8–10) пояснюється взаємодією між аніоном тетрацикліну та гідроксильними радикалами. Ця взаємодія зумовлена високою електронною густиною в кільцевій структурі молекули, що підсилює утворення комплексів з гідроксильними радикалами. Крім того, при підвищеному рН змінюється енергетичний профіль молекулярних орбіталей, що збільшує здатність молекули тетрацикліну до поглинання фотонів. Це підсилене поглинання світлової енергії сприяє фотодисоціації молекули, що призводить до підвищення ефективності її розкладання.

Результати дослідження впливу концентрації фотокаталізатора  $\text{TiO}_2/\text{Ag}_{\text{ннт}}$  на розкладання ТЦ свідчить, що, при збільшенні концентрації фотокаталізатора з 0,6 до 1,2 г/л, константа швидкості деградації ТЦ значно збільшується з 30,67% до 98% протягом 90 хвилин. Відповідно до даних, представлених в табл. 1, збільшення дози каталізатора з 0,6 до 1,2 г/л призвело до підвищення кон-

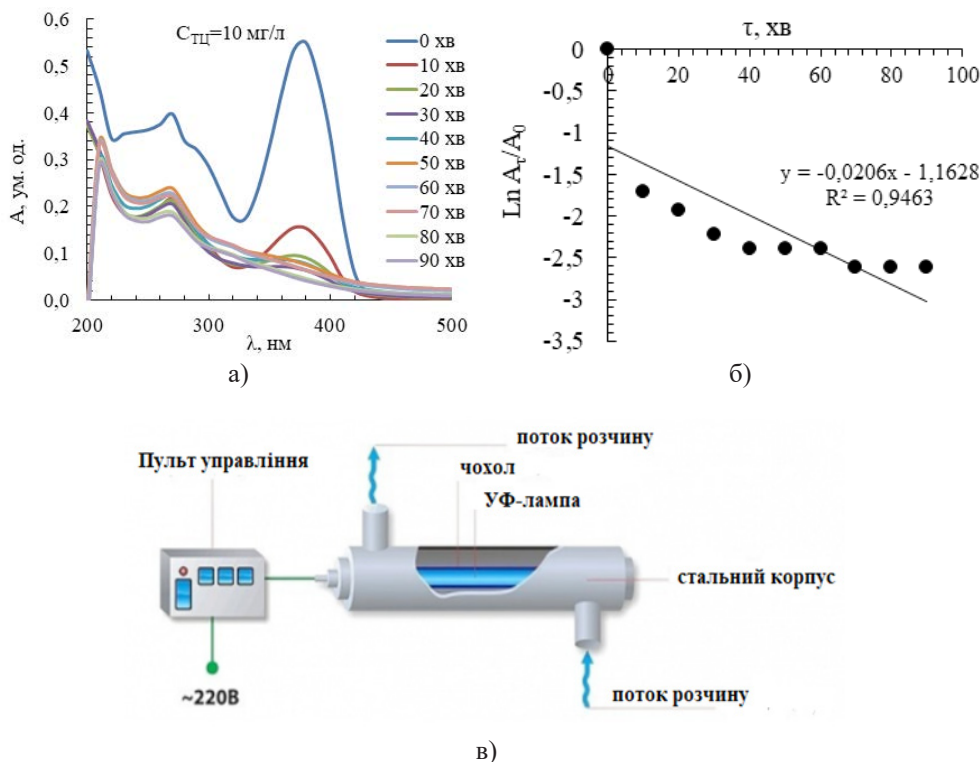


Рис. 6. Кінетика спектрів (а), ступінь деградації та залежності  $\ln A_t/A_0$  (б) при фотокаталітичній деградації тетрацикліну гідро хлориду різної початкової концентрації у реакторі проточного типу: УФ=274 нм, 10 мг/л (а), 40 мг/л (б), 100 мг/л (в)  $m_{(TiO_2/Ag_{нч})}=1,2$  мг/л

станти швидкості реакції ( $k$ ) з 0,008 до 0,016  $хв^{-1}$ . Збільшення кількості активних центрів на поверхні фотокаталізатора вважається основною причиною спостережуваного ефекту. Проте подальше підвищення концентрації фотокаталізатора понад 1,2 г/л не мало значного впливу на ефективність деградації. Тому, з огляду на економічні аспекти та досягнуту ефективність розкладання, оптимальною дозою для подальших фотокаталітичних експериментів було визначено 1,2 г/л  $TiO_2/Ag_{нч}$ .

Таблиця 1

#### Вплив умов фотокаталітичного опромінення на швидкість розкладання тетрацикліну гідро хлориду

Умови фотодеструкції тетрацикліну $TiO_2/Ag_{нч}$	Навантаж. $TiO_2/Ag_{нч}$	Константа швидкості розкладання, $хв^{-1}$
pH=8, С ТЦ 10 мг/л, УФ=365 нм,	1,2	0,016
pH=8, С ТЦ 10 мг/л, УФ=247 нм		0,02
pH=4, С ТЦ 10 мг/л, УФ=247 нм		0,0009
pH=6, С ТЦ 10 мг/л, УФ=247 нм		0,0017
pH=8, С ТЦ 10 мг/л, УФ=247 нм		0,016
pH=8, С ТЦ 10 мг/л, УФ=247 нм	0,6	0,008

**Висновки.** У статті представлено характеристику зразків діоксиду титану, модифікованих нано-

частинками срібла ( $Ag_{нч}$ ), середній розмір яких складає 10–32 нм. НЧ розташовані на поверхні модифікованого титан (IV) оксиду у вигляді несучільної структури. Отримані композити зберігають оптичні властивості модифікатора – мають типову смугу поглинання у видимому діапазоні при  $\lambda=420-424$  нм, що відповідає поверхневому плазмонному резонансу срібла. Введення металу-допantu зменшує ширину забороненої зони з 3,0–3,5 еВ до 2,6–2,7 еВ, сприяючи підвищенню фотокаталітичної активності. Досліджено фотокаталітичну активність комерційного зразка діоксиду титану, модифікованого наночастинками срібла плазмохімічним способом, при УФ опроміненні. Виявлено, що зразки  $TiO_2/Ag_{нч}$  демонструють вищу ефективність фотодеграції тетрацикліну, ніж немодифікований  $TiO_2$ , завдяки ефекту плазмонного резонансу. Проаналізовано вплив таких параметрів, як концентрація тетрацикліну (5–100 мг/л), тривалість фотодеграції (10–120 хв.), тип опромінення ( $\lambda=274-344$  нм), доза фотокаталізатора, рН розчину (3–10). Встановлено, що ефективність деградації зростає зі збільшенням тривалості опромінення, підвищенням рН до 8–10 та зменшенням концентрації до 10–20 мг/л. Розкладання ТЦ відповідає псевдопершогопорядковій реакції зі швидкістю  $k=0,0028-0,02$   $хв^{-1}$ .

Список літератури:

1. Sawunyama L., Oyewo O., Onwudiwe D. C., Makgato S. S. Photocatalytic degradation of tetracycline using surface defective black TiO<sub>2</sub>-ZnO heterojunction photocatalyst under visible light. *Heliyon*. 2023. Vol. 9(11). e21423. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21423>.
2. Chakhtouna H., Benzeid H., Zari, N., et al. Recent progress on Ag/TiO<sub>2</sub> photocatalysts: photocatalytic and bactericidal behaviors. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28. P. 44638–44666. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14996-y>.
3. Gang R., Xia Y., Xu L., Zhang L., Ju S., Wang Z., Koppala S. (2022). Size-controlled Ag-decorated TiO<sub>2</sub> plasmonic photocatalysts for tetracycline degradation under visible light. *Surfaces and Interfaces*. 31. Vol. 102018. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102018>.
4. Antibiotics Market Growth Fueled by Increasing Demand, Forecasted USD 584 Billion by 2032 [Електронний ресурс] // PharmiWeb. – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.pharmiweb.com/press-release/2024-04-15/antibiotics-market-growth-fueled-by-increasing-demand-forecasted-usd-584-billion-by-2032> – Назва з екрану.
5. Wang X., Zhu G., Wang C., Niu Y. Effective degradation of tetracycline by organic-inorganic hybrid materials induced by triethylenediamine. *Environmental Research*. 2021. Vol. 198 (36). 111253. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111253>
6. Ma S., Qin Y., Sun K., Ahmed J., Tian W., Ma Z. Round-the-clock adsorption–degradation of tetracycline hydrochloride by Ag/Ni-TiO<sub>2</sub>. *Materials*. 2024. Vol. 17 (12). 2930. <https://doi.org/10.3390/ma17122930>.
7. Hunge Y. M., Yadav A. A., Kang S. W., Kim H. Photocatalytic degradation of tetracycline antibiotics using hydrothermally synthesized two-dimensional molybdenum disulfide/titanium dioxide composites. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2022. Vol. 606(Pt 1). P. 454–463. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.07.151>.
8. Divakaran K., Baishnisha A., Balakumar V., Perumal K. N., Meenakshi C., Kannan, R. S. Photocatalytic degradation of tetracycline under visible light using TiO<sub>2</sub>@sulfur-doped carbon nitride nanocomposite synthesized via in-situ method. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9 (4). 105560.
9. Ortega-Granados J. A., Thangarasu P. Photo-deposition of Ag/AuNPs on TiO<sub>2</sub> accelerating the oxidation of tetracycline under visible light. *Materials Letters*. 2022. Vol. 321. 132455. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132455>.
10. Skiba M., Vorobyova V. Evaluation of antibacterial, antioxidant, and photocatalytic activities of silver-decorated TiO<sub>2</sub>: comparison of green and classic capping agents. *Applied Nanoscience*. 2023. Vol. 13. P. 5185–5198. <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02748-4>.
11. Skiba, M., Vorobyova, V., Pasenko, O. Surface modification of titanium dioxide with silver nanoparticles for application in photocatalysis. *Applied Nanoscience*. 2021. Vol. 4. P. 1175–1182. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01739-1>.

**Skyba M.I., Skyba Yu.M., Zaluzhnyi D.S., Vorobiova V.I. EFFECT OF TITANIUM DIOXIDE SURFACE MODIFICATION WITH NANOSILVER ON PHOTOCATALYTIC PROPERTIES: DEGRADATION OF TETRACYCLINE HYDROCHLORIDE**

*Pharmaceutical compounds belong to the category of "emerging pollutants" by polluters of water resources due to their widespread use for medical purposes, which leads to the release of these compounds in high concentrations into pharmaceutical and hospital wastewater. The article presents the characteristics of titanium dioxin samples modified with nanosilver: Ag NPs with an average size of dcp=10–32 nm are located on the surface of the modified titanium (IV) oxide with a discontinuous structure. The resulting composites retain the optical properties of the modifier metal – they have a typical absorption band in the visible range at λ=420–424 nm, which corresponds to the surface plasmon resonance band of silver NPs. It was established that the introduction of a dopant metal provides the prerequisites for increasing the photocatalytic activity – reducing the band gap of the composite from 3.0–3.5 eV to 2.6–2.7 eV. The photocatalytic activity during UV irradiation of a commercial sample of titanium dioxin, the surface of which was modified with silver nanoparticles by a plasma–chemical method, was investigated. It was demonstrated that the TiO<sub>2</sub>/AgNp samples are characterized by a higher efficiency of photodegradation to tetracycline compared to the unmodified TiO<sub>2</sub> sample due to the effect of surface plasmon resonance of silver nanoparticles. The influence of a number of parameters of the photocatalytic process of tetracycline degradation was established: the concentration of the antibiotic tetracycline hydrochloride, 5–100 mg/l, the duration of photodegradation τ=10–120 min., the type of UV–irradiation (λ=274–365 nm), the concentration of the photocatalyst 0.6–1.2 g/l, the pH value of the solution (3–10) on the efficiency of tetracycline degradation and the decomposition constant of tetracycline hydrochloride. It was demonstrated that the decomposition of TC is described by a pseudo first–order reaction with a calculated value of k=0.0028–0.02 min<sup>-1</sup>. The regularity of the increase in the efficiency of the destruction of TC with an increase in the duration of irradiation, the alkalinity of the solution to pH=8–10 and a decrease in the concentration of the original solution to 10–20 mg/l was established.*

**Key words:** modification, photocatalyst, antibiotic, oxidation, tetracycline.

# ТРАНСПОРТ

UDC 656.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/11>**Akmaldinova V.Ye.**

National Aviation University

**Volkovska H.H.**

National Aviation University

## AVIATION SAFETY ASSESSMENT AND FORECASTING: SCIENTIFIC AND PRACTICAL ASPECTS

*The article is devoted to the problems and peculiarities of the airport safety provision process. A detailed informational research was conducted on the subject. The main concepts and principles of ensuring aviation safety in air transport have been analyzed, as well as the process of organizing aviation safety at the airport. The scientific and practical aspects of aviation safety assessment and forecasting are defined. The process of checking passengers and baggage for aviation safety was analyzed. It was founded that since the development of air transport the emergence of the possibility of air passenger, baggage and various cargoes transportation, there has been a need to develop an aviation safety system ensuring human safety in various aviation complexes and airport terminals. At the initial research stage aviation safety is perceived as a state of protecting aviation from any acts of unlawful interference in its activities. The aviation industry is one of the vivid examples of possible threats to human life.*

*Ensuring aviation safety requires new assessments, forecasts and response to terrorist acts and unlawful interference in the operation of air transport objects. This is facilitated by introducing into airlines practice new equipment for checking the documents authenticity, identification of passengers and detecting potentially dangerous substances. Therefore, the search and implementation of an effective method for assessing and forecasting the improvement of airport aviation safety is one of the scientific and practical problems requiring an urgent in-depth research.*

*The study has identified the most optimal methods and techniques for conducting research and relevant approaches, analyzed the main processes of passenger and baggage control for aviation safety with the aim of improving the safety technologies.*

**Key words:** *aviation safety, model, air transportation, airport, means of ensuring aviation safety, flight safety, assessment and forecasting the aviation safety, acts of unlawful interference in aviation activity.*

**Introduction.** Aviation safety is a priority area of air transport activity and it is of crucial importance for the air transport system of the entire country.

Today, in the conditions of a high terrorist threat of using explosive devices towards civil aviation facilities and aircraft, the primary task is to increase the aviation safety level. One of the main measures of ensuring aviation safety as for related threats is screening passengers, their hand luggage and baggage.

In the aviation safety sector, the analysis has shown that the following negative trends prevail in this area: terrorist activity has increased significantly, becoming more sophisticated and brutal, terrorist organizations have an access to a wide range of financial opportunities and financial criminality is increasing.

All this forces people to put more serious attention to the problem of increasing the importance of ensuring civil aviation safety. Unauthorized interference in the activities of civil aviation, even partial, can result in significant financial, material, moral and political damage. Possible public disclosure that may accompany all incidents regarding the safety of passenger and cargo transport should also be taken into account.

The requirements for the care of air passengers when entering the controlled airport area have been in place for a long time, as well as the requirements for the care of their luggage. However, until recently, implementation of these requirements usually remained in the background. This was partly because it was much cheaper to use through-arc metal detectors or magnetometers instead of more sophisticated

X-ray equipment for such inspections, or due to the fact that the industry was limited only to the production of means of detecting metal weapons and other prohibited objects that could be hidden under the passengers' clothes.

**Formulation of the problem.** Recently, a certain tendency has emerged to consider the issue of ensuring aviation safety from the point of view of management level optimization and consistently solving the tasks of identification, measurement, assessment and decision-making. The analysis of the results obtained in this direction shows that there is an urgent need to address the formalized problems of the subject area provided by mathematical models of the aviation safety management process optimization.

Considering aviation safety as a subject of scientific research, it should be noted that the focus at this stage is ensuring aviation safety, i.e. supporting facilities (technology, economy, regulations, resources, etc.). Modern airports operate in a competitive environment, so the quality of service becomes an important factor in attracting transit passengers and air carriers by airlines. Most world airports operate on a commercial basis, and attracting profitable users to them is an economic necessity. While ensuring aviation safety, it is also necessary to improve the culture of air passenger service in general [1].

For IATA member states the main task of protecting international civil aviation is to ensure the safety of crew, passengers, ground staff, aircraft as well as the airport facilities and services of civil aviation against acts of unlawful interference on the ground and in flight. This can usually be achieved through a combination of activities and the involvement of different human and material resources at the international and national levels, as well as at the airport itself [2].

To ensure aviation safety, new assessments, forecasts and responses to terrorist acts and acts of unlawful interference in the operation of air transport facilities are necessary. This is facilitated by the introduction into the airlines practice of new equipment for detecting the authenticity of documents, identification of passengers and detection of potentially dangerous substances.

Thus, the search and implementation of effective assessment and forecasting methods for the improvement of airports aviation safety level are one of the scientific and practical problems urgently needing an in-depth study [3].

**Analysis of recent research and publications.** Issues related to aviation safety were directly or indirectly investigated by: M.M. Avakov, V.D. Bordunov, M.M. Volkov, R.O. Gerasimov, A.H. Lyak-

hov, Yu.M. Maleev, A.Yu. Pizhakov, V.I. Ryzhiy, G.R. Khilimov, R.I. Abeyratne, A. Abramovsky, S.K. Agrawala, Y. Alexander, I. Awford, R.P. Boyle, J. Busuttill, C.F. Butler, K. Chamberlain, J.T. Choi, D.Y. Chung, J.H. Daniel, P.S. Dempsey, C. Emanuelli, A.E. Evans, M.J. Fenello, M.E. Fingerman, D. Fiorita, G.F. Fitzgerald, D. Gero, L.C. Green, B. Hoffman, B. Jenkins, N.D. Joyner, O.J. Lissitzyn, R.H. Mankiewicz, R.J. McGrane, E. McWhinney, A.I. Mendelsohn, A. Merari, M. Milde, J.F. Murphy and other scientists.

**Task statement.** The study of scientific and practical provisions of increasing the aviation safety level at the airport.

**Outline of the main material of the study.** Lately, there has been a clear trend to consider the protection of aviation safety in terms of aviation safety levels optimal management with coherent solutions of identification, measurement, assessment and decision-making tasks.

The heterogeneity of the environment is determined by the point character of the shield. It depends on the principles of physical implementation of protection means. Instability is determined by the dynamics of the protected object parameters.

The concept of vulnerability, which is the degree of a transport infrastructure object protection level assessed by the characteristics of protection and established requirements, quantitatively reflects the status of a protected object from the point of view of aviation safety. The concept of quality is also well known, and it is considered as the degree of compliance with the inherent characteristics of a requirement. In this context, it can be said that the quality of object protection, within certain limits, can be defined as the opposite of vulnerability.

An important conclusion can be drawn from this: the quality of transport infrastructure means of protection is an environmental parameter ensuring the protection of objects. In other words, there are imaginary zones of civil aviation objects protection that provide countermeasures against a complex of current or foreseeable threats, the controlled parameter of which is the quality of protection means.

The proposed model belongs to the class of boundary value problems described by partial differential equations. It should be noted that the proposed presentation of the mission language, especially the structural-logical model of vulnerability, is very imperfect and does not reflect some nuances of physical processes that actually exist in aviation safety. At the same time, this statement of the task is acceptable in the absence of any model at all, provided that the

model is refined after the completion of the formalization stage [4].

Based on the above, the purpose at this stage is to analyze the mathematical apparatus of boundary tasks theory to assess the possibility of its application for the formalization of parameters in the field of transport infrastructure objects protection against acts of unlawful interference.

Perfection of aviation safety provision (ASP) systems of civil aviation objects is defined by their quality, determined by the relevant indicators in accordance with the criteria for choosing the best combination. The quality indicator of the ASP system can be understood as the signs that allow us to evaluate the characteristics of the system and its functioning. These indicators are well established in terms of reliability, stability, ergonomics, cost, etc. The ASP system of a civil aviation facility is a complex territorially distributed system consisting of subsystems based on different physical principles, different engineering methods and service personnel [4].

Such subsystems include, for example, means of monitoring the state of civil aviation facilities, information support for the functioning of the air traffic control system, communication, computer equipment, information security, etc. A distinctive feature of the air traffic control system is the direct participation of aviation personnel – experts who control the process of implementing acts of unlawful interference at the civil aviation facility.

The main characteristics of ASP:

1) stability – the ability of systems to perform and timely restore their functions in the conditions of all possible types of dangerous influences (including the influence of performers) and obstacles;

2) responsiveness – the ability to respond to acts of unlawful interference in a timely manner;

3) continuity – the ability to function stably at any time;

4) secrecy – the ability to keep from the guilty the secret as to means of detecting and preventing the acts of unlawful interference against accidental and intentional destructive effects of a natural or artificial nature.

In this regard, it is necessary to formulate a concept of the ASP system effectiveness and build a criterion for evaluating the best option for its formation using values  $X = \{xn\}$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ , indicating the realized of the ASP system characteristics (topology, engineering and technical means, algorithms of the ASP system, the number and qualifications of personnel, etc.). The  $W^{ASP}$  efficiency indicator of the ASP system, in addition to other quality indicators,

depends on the specific task of detecting and interrupting the act of unlawful interference [5]:

$$W^{ASP} \in \Pi \quad (1)$$

where  $\Pi$  – value dependent on an infinite number of the ASP system performance indicators.

It is necessary to find analytical dependencies of the efficiency indicator  $W^{ASP}$  of ASP system on the set  $\Pi$  values of all other indicators of its quality, as well as the set of  $\beta$  types of acts of unlawful interference in the activity of a specific civil aviation object and conditions  $\phi$  for their implementation in the form of descriptions of civil aviation objects and acts of unlawful interference [5]:

$$W^{ASP} = W^{ASP}(\Pi, \beta, \phi) \quad (2)$$

At the same time, it is necessary to take into account the vulnerability of the civil aviation object and the damage to it caused by the act of unlawful interference. For this purpose, the concept of probability of losses occurrence is introduced  $U_{ijl}$   $l$ -th type  $i$ -th civil aviation object, given its vulnerability  $W_i(B_j)$  to  $j$ -th act of unlawful interference with the probability of receiving the specified damage under the condition of this act of unlawful interference implementation an indicator is offered [5]:

$$W_{ijl}^{ASP} = 1 - W_{(U_{ijl})}^i, j = 1, 2, \dots, J, l = 1, 2, \dots, L \quad (3)$$

where  $W_{(U_{ijl})}^i = W_{(B_j)}^i W_{(U_{ijl})} / B_j$  is formulated as the risk of the  $i$ -th civil aviation object receiving damage  $U_{ijl} \in K_{vijl}$ . Thus, risk here is a probability,  $W_{(B_j)}^i$  – vulnerability of the  $i$ -th civil aviation object to the implementation of the  $j$ -th act of unlawful interference in the object's activity.

$W_{(U_{ijl})} / B_j$  – conditional probability of receiving damage by the  $i$ -th civil aviation object  $U_{ijl} \in K_{vijl}$  provided that the  $j$ -th act of unlawful interference occurred;  $K_{vijl}$  – set of damage values of the  $l$ -th type of the  $i$ -th civil aviation object determining it  $v$  ( $v = 1, 2, \dots, v$ ) category of importance.

Next, an average value (for each attempt to carry out the  $j$ -th type of unlawful interference act) of the  $l$ -th type of damage is considered:

$$k_{ijl} = W_i(k_{ijl}) U_{ijl} \quad (4)$$

From this it turns out:

$$W_{ijl}^{ASP} = 1 - k_{ijl} / U_{ijl} \quad (5)$$

where the ratio  $k_{ijl} / U_{ijl}$  characterizes the share of the loss that falls on each attempt to commit an act of unlawful interference, up to the amount of the loss upon successful implementation of this unlawful interference act. Here it can be noted that the idea of damage is constructive, but finding the average value

with an unknown probability that cannot be calculated, is impossible.

Quantitative evaluation of the performance indicator of the aviation safety provision system can be carried out on the basis of the analysis and processing of statistical data on act of unlawful interference during civil aviation facilities operation and their consequences (damages) for these facilities. At present, expert methods and methods of statistical processing of information on the quality indicators value are used to research and evaluate the quality indicators (including efficiency) of complex systems including the system of the civil aviation object – the system of its aviation safety provision, physical modeling, mathematical modeling. Expert survey by *Delphi* method is based on answers in the quantitative form.

The *Delphi method*, as some researchers state [5], can provide an assessment of the performance indicator of the aviation safety provision system, and in some cases is the only possible scientific tool for obtaining the necessary information, for example, the justification of the types of civil aviation objects categories. We can agree with the authors of the research that sometimes under certain conditions it is fair, but in general it is necessary to switch to Fuzzy Sets. The fact is that Delphi has an indicator  $W_{ijl}^i$ , the frequency of implementation of the *j*-th act of unlawful interference, which led to the loss of the *l*-th type to the *i*-th object of civil aviation, makes sense, and the value of  $W_{ijl}^{ASP}$  is determined in the form:

$$W_{ijl}^{ASP} = 1 - m_{ijl} / M_{ijl} \quad (6)$$

where  $m_{ijl}$  – number of successful implementations of the act of unlawful interference,  $M_{ijl}$  – total number of execution attempts of the act of unlawful interference.

At the same time, the lack of complete statistics, which is necessary, does not allow to forecast reliably the value of the efficiency indicator in a certain range of warnings. It is necessary to use proactive management methods according to the ICAO methodology, because there are no algorithms and methods for simple statistical forecasting with small volumes of sample results.

Physical modeling of the process of countering the violator with the aviation safety provision system is implemented during training the aviation safety provision system personnel. This is the only correct approach though it's non-stochastic.

Models of average dynamics, probabilistic models in a continuous system (model) of mass service, stochastic duels, discrete (Markov) chains of various forms, models of statistical tests (Monte Carlo method) are proposed in [6].

All this should be recognized as non-constructive, since there is no mass experiment. The nature of uncertainties in the actions of violators is practically not described here, with a large number of factors of various physical content contributing to act of unlawful interference implementation in the activity of civil aviation objects, which is an insurmountable obstacle for the analytical description of the risk factors affecting this process.

The concept of flight safety is based on the definition of the meaning of safety as a state of systems with an acceptable level of risk of consequences or damage in the conditions of exposure to the considered systems of dangerous factors generated by the external environment and the system itself [7].

Issues of hazard model development, risk assessment and determination of safety levels are discussed, taking into account product reliability characteristics and airworthiness indicators.

The definition and classification of risks are based on indications of risk events with the nature of events, such as randomness and consequential losses.

At the same time, the physical meaning of risk as a mathematical category and the corresponding risk value or measure of risk (a measure that can be measured or managed according to the principles of classical management theory) is useful and necessary based on the application of the concept of risk defined by the phenomena. A widely used risk assessment formula is defined as a vague set: "high risk", "low risk".

The presented risk as a characteristic of the class is reasonably considered to be a mathematical value that determines the predicted amount of danger in a dangerous state of the system when a dangerous or risky event *R* is possible (here – a discrete event that may or may not occur).

Therefore, the state of the system can be understood to a first approximation in terms of the definition of reliability theory as one of the combinations of reliability elements in such physical states as failure, fail-safe. The measure of the possibility of any noticeable states of the considered type appearance when analyzing groups of events at the stage of analyzing the structure of the result space (in the complete group of events) is irrelevant and the distribution function of events or other indicators, the method of linking event properties with type arguments, is not taken into account for probability parameter in the form of a random moment during element failure. This approach makes it possible to develop models of system hazards, as required by ICAO, Boeing, IATA, and the Federal Aviation Administration for flight safety management in civil aviation. Such an approach is proposed here for aviation safety provision.



**Conclusions.** Aviation safety is a set of measures, as well as human and material resources, aimed at protecting civil aviation against acts of unlawful interference in its activities. Aviation safety is a priority area of air transport activity and is of key importance for the transport system of the entire country.

The research has found that in order to constantly improve the effectiveness of aviation safety, the state must create appropriate organizational conditions that will ensure the sustainable functioning of special institutional mechanisms – organizations (scientific and educational centres, institutes, associations) at the international, regional, national or branch level. Their activities should be aimed at: practical implementation of the strategy and tactics of development and improvement of the aviation safety system; solv-

ing the key problems of increasing the efficiency of aviation area.

It should be noted that increasing the productivity of civil aviation facilities raises the need to introduce and implement precautionary measures to ensure their safety. So, the introduction of modern technologies ensuring a high level of aviation safety in an aviation enterprise is an urgent issue for the development of airlines.

The research has analysed the state of the global air transport market and an assessed the conditions of aviation safety at the global level, based on which it was established that the issue of ensuring flight safety and improving the aviation safety level is highly significant and requires constant monitoring, as well as the improvement and use of modern methods and technologies for their solution.

### Bibliography:

1. Невідкладні заходи щодо поліпшення діяльності цивільної авіації. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://regulation.gov.ua/documents/id177277>.
2. Система управління ризиками авіаційної діяльності / Харченко В.П., Алексєєв О.М. / Под ред. Харченко В.П.: – К. : НАУ, 2018. – 312 с.
3. Авіаційна безпека – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://oppb.com.ua/news/ryatuvaty-y-ryatuvatysya-yak-pracyuye-aviaciynna-bezpeka-v-aeroportu-boryspil-i-chy-gotovi>.
4. Волинський В. Ю., Михайлов Ю. Б. Методологічні питання кількісної оцінки ефективності систем забезпечення авіаційної безпеки об'єктів цивільної авіації // Транспортна безпека та технології. 2011. № 1 (24). С 30–37.
5. Смуров М. Ю., Куклев Є. А., Євдокимов В. Г., Гіпч Г. Н. Розробка інструментів оцінювання ризиків виникнення АНВ в САБ аеропортового комплексу. 2012. № 2 (39). С. 26–29.
6. Безпека цивільної авіації як комплексне поняття. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.law.nau.edu.ua/images/Nauka/Naukovij\\_jurnal/2007/statji\\_n3\\_4\\_2007/Filippov\\_21.pdf](http://www.law.nau.edu.ua/images/Nauka/Naukovij_jurnal/2007/statji_n3_4_2007/Filippov_21.pdf)
7. Марінцева К.В. Пасажи́рські перевезення: підручник/ К.В.Марінцева. – К.:НАУ, 2009. – 228 с.

### Акмалдінова В.Є., Волковська Г.Г. ОЦІНКА ТА ПРОГНОЗУВАННЯ Авіаційної БЕЗПЕКИ: НАУКОВО-ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ

*Статтю присвячено проблемам та особливостям процесу забезпечення безпеки аеропорту. З цього питання було проведено детальне інформаційне дослідження. Проаналізовано основні поняття та принципи забезпечення авіаційної безпеки на повітряному транспорті, а також процес організації авіаційної безпеки в аеропорту. Визначено наукові та практичні аспекти оцінки та прогнозування авіаційної безпеки. Проаналізовано процес перевірки пасажирів і багажу на авіаційну безпеку. Встановлено, що з моменту розвитку авіаційного транспорту і появи можливості повітряних перевезень пасажирів, багажу та різноманітних вантажів виникла необхідність у розробці системи авіаційної безпеки, що забезпечує безпеку людей у різноманітних авіаційних комплексах та терміналах аеропорту. На початковому етапі дослідження авіаційна безпека сприймається як стан захищеності авіації від будь-яких актів незаконного втручання в її діяльність. Авіаційна промисловість є одним із яскравих прикладів можливих загроз життю людей.*

*Забезпечення авіаційної безпеки вимагає нових оцінок, прогнозів і реагування на терористичні акти та акти незаконного втручання в роботу об'єктів повітряного транспорту. Цьому сприяє впровадження в практику авіакомпаній нового обладнання для перевірки достовірності документів, ідентифікації пасажирів та виявлення потенційно небезпечних речовин. Тому пошук і впровадження ефективного методу оцінки та прогнозування підвищення рівня авіаційної безпеки аеропортів є однією з науково-практичних проблем, що потребують невідкладного поглибленого дослідження.*

*У результаті дослідження визначено найбільш оптимальні методи, методики та актуальні підходи до проведення досліджень, проаналізовано основні процеси контролю пасажирів і багажу на авіаційну безпеку з метою вдосконалення технологій авіаційної безпеки.*

**Ключові слова:** авіаційна безпека, модель, повітряні перевезення, аеропорт, засоби забезпечення авіаційної безпеки, безпека польотів, оцінка та прогнозування авіаційної безпеки, акти незаконного втручання в авіаційну діяльність.

**Берневек Т.І.**

Одеський національний морський університет

**Прохоров В.К.**

Одеський національний морський університет

## ІНТЕГРАЦІЯ МОРСЬКОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ В ГЛОБАЛЬНІ ТРАНСПОРТНІ МЕРЕЖІ

У статті здійснено комплексний аналіз сучасного стану та перспектив розвитку морської транспортної системи України в контексті її інтеграції до глобальних транспортних мереж. Зокрема підкреслюється ключову роль морського транспорту в забезпеченні міжнародної торгівлі, а також стратегічне значення України як транзитної держави, здатної ефективно поєднувати транспортні потоки між Європою, Азією та іншими частинами світу. Особливу увагу приділено основним проблемам галузі, серед яких старіння морського флоту, брак інвестицій у розвиток інфраструктури, необхідність приведення національних стандартів у відповідність до європейських екологічних та технічних вимог. В умовах інтеграції до європейської транспортної системи виникає необхідність модернізації портової інфраструктури, яка є невід'ємною частиною процесу підвищення ефективності перевезень і зниження логістичних витрат. У статті також детально розглядається роль міжнародних інвестицій та державно-приватного партнерства, які можуть стати рушійною силою розвитку галузі, сприяючи не лише покращенню інфраструктури, а й підвищенню конкурентоспроможності українських портів на світовому рівні. Окремий акцент зроблено на перспективах розвитку мультимодальних перевезень, які забезпечують більшу ефективність логістичних операцій за рахунок інтеграції морського, залізничного та інших видів транспорту. Проаналізовано можливості України в контексті її участі в Транс'європейській транспортній мережі, яка забезпечує доступ до ключових європейських транспортних коридорів, що мають вирішальне значення для освоєння нових ринків. У статті також окреслено основні завдання для забезпечення сталого розвитку морської транспортної системи України, включаючи підвищення екологічної безпеки, оптимізацію логістичних процедур, інтеграцію сучасних технологій та залучення іноземних інвестицій для подальшого зміцнення економічного потенціалу країни.

**Ключові слова:** морська транспортна система, євроінтеграція, міжнародні інвестиції, модернізація портів, мультимодальні перевезення, екологічні стандарти, логістика, транспортна мережа, транзитний потенціал, морські перевезення.

**Постановка проблеми.** Морська транспортна система України відіграє ключову роль у забезпеченні міжнародної торгівлі та економічної стабільності країни. Однак в умовах європейської інтеграції та глобалізації ця галузь стикається з численними викликами. По-перше, значна частина українського флоту є застарілою, що негативно впливає на ефективність морських перевезень та конкурентоспроможність українських портів на міжнародному ринку. По-друге, портова інфраструктура України потребує нагальної модернізації, оскільки багато причалів, складів та перевантажувального обладнання не відповідають сучасним міжнародним стандартам. Ці проблеми загострюються недостатнім фінансуванням та відсутністю масштабних інвестицій у морську галузь.

Крім того, інтеграція в європейські та світові транспортні мережі вимагає впровадження нових

екологічних стандартів та інноваційних технологій для зменшення впливу на навколишнє середовище, що створює додаткові виклики для галузі. З іншого боку, географічне розташування України створює значні можливості для розвитку її транзитного потенціалу, але для цього потрібні комплексні реформи, державна підтримка та міжнародні інвестиції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Проблематика розвитку морської транспортної системи України активно досліджується в науковій літературі. Так в [1] автори аналізують тенденції розвитку морегосподарського комплексу України в умовах євроінтеграції, підкреслюючи необхідність модернізації інфраструктури та покращення конкурентоспроможності. Морська доктрина України на період до 2035 року [2] визначає стратегічні напрями розвитку морської галузі

та адаптацію до міжнародних стандартів. У [3] досліджуються наукові засади розвитку суднобудування, підкреслюючи важливість модернізації виробничих потужностей. Автори у [4] звертають увагу на потенціал морегосподарського комплексу, наголошуючи на необхідності залучення інвестицій для його розвитку. Наукова праця [5, 6] аналізує стратегії євроінтеграції, зокрема їх вплив на розвиток транспортної інфраструктури України. У роботах [9, 10, 11] розглядаються питання екологічної безпеки судноплавства, оптимізації портових операцій та впровадження інноваційних технологій для зниження впливу на довкілля. Представлені дослідження підкреслюють важливість комплексного підходу до модернізації морської транспортної системи України та її інтеграції в європейські і глобальні транспортні мережі.

**Постановка завдання.** Основна проблема полягає в тому, як забезпечити сталий розвиток і модернізацію морської транспортної системи України, зберігаючи при цьому її конкурентоспроможність та екологічну відповідність в умовах інтеграції у світові транспортні мережі.

**Виклад основного матеріалу.** Морська транспортна система відіграє ключову роль в економіці України з огляду на її стратегічне географічне положення і вихід до Чорного та Азовського морів. Українські порти забезпечують значну частку зовнішньоторговельних перевезень країни, будучи важливою ланкою в ланцюжку поставок не тільки для України, а й для країн-сусідів. Розвиток морської інфраструктури та ефективна експлуатація флоту безпосередньо впливають на економічну стабільність, зростання експорту і поліпшення логістичних зв'язків з іншими країнами. Крім того, морський транспорт є критично важливим для інтеграції України до глобальних ринків і транзитних транспортних мереж, таких як коридори «Схід-Захід» і «Північ-Південь». Однак на тлі глобальної інтеграції світових транспортних мереж, Україна стикається з низкою значних викликів. Серед них можна виокремити старіння морського флоту, брак інвестицій у модернізацію портової інфраструктури та необхідність адаптації до міжнародних стандартів. Важливу роль також відіграє сталий розвиток, який вимагає впровадження екологічно чистих технологій і рішень для зниження вуглецевого сліду, підвищення ефективності та забезпечення безпеки транспортних процесів. Ці фактори вимагають комплексного підходу до розвитку морської транспортної системи України. Мета цієї статті - дослідження шляхів забезпечення сталого роз-

витку морської транспортної системи України в умовах її інтеграції в міжнародні транспортні мережі. Розглядаються ключові завдання модернізації портів, впровадження інноваційних рішень, а також адаптації морської галузі до європейських стандартів, що дасть змогу посилити її конкурентоспроможність на світовому рівні.

**Сучасний стан морської транспортної системи України.** Морська транспортна система України включає в себе мережу морських портів, які відіграють ключову роль у забезпеченні зовнішньої торгівлі країни. На сьогодні в Україні діє 13 континентальних морських портів, серед яких найбільшими є Одеса, Чорноморськ і Південний. Ці порти забезпечують транзитні перевезення та обслуговують експортні та імпорتنі операції для України та сусідніх країн. Пропускна спроможність портів України становить близько 262 млн тонн вантажів на рік, що робить їх важливим елементом національної транспортної інфраструктури та економіки. Загальний флот України налічує близько 1337 одиниць, включно з морським і річковим транспортом. Однак, понад 85% суден перевищують нормативний термін служби, що істотно знижує ефективність їхньої експлуатації. У структурі морського транспорту особливо виділяється наявність спеціалізованого флоту, включно з контейнеровозами, поромами, рефрижераторами і суднами для перевезення великовагових вантажів. Проте, незважаючи на наявність таких суден, їхній технічний стан залишається проблематичним. Крім того, морська транспортна система України стикається з викликами, пов'язаними з недостатньою модернізацією портової інфраструктури. У більшості портів відзначається застарілий стан причалів, складських приміщень і перевантажувального обладнання, що знижує їхню конкурентоспроможність на міжнародній арені. За оцінками, значна частина портового обладнання, включно з кранами та складськими приміщеннями, потребує модернізації та технічного оновлення для відповідності міжнародним стандартам.

Однією з головних проблем є старіння флоту, яке ускладнює проведення модернізації та оновлення суден. Це знижує конкурентоспроможність українського морського транспорту, особливо в умовах євроінтеграції, де вимоги до екологічних і технічних стандартів значно вищі. Крім того, відсутність достатнього обсягу інвестицій в інфраструктурні проекти, спрямовані на оновлення портів і модернізацію флоту, поглиблює поточні виклики галузі. Незважаючи на наявні проблеми,

Україна має значний потенціал для розвитку морської транспортної системи. Географічне положення країни та її морські порти можуть стати важливою ланкою в глобальних ланцюжках поставок, за умови реалізації програм модернізації та поліпшення логістичної інфраструктури.

Втім, слід відзначити і позитивні риси поточного стану морської транспортної системи України. Так, згідно Міністерства Відновлення України тільки за 10 місяців роботи українського морського коридору, який був забезпечений завдяки Об'єднаним силам оборони України, було експортовано 55 млн тонн вантажів, сумарно було завантажено 1954 судна, які транспортували 55 млн тонн вантажів. Зазначається, що при цьому 37,4 млн тонн агропродукції було експортовано до 45 країн світу. Постійне нарощування обсягів перевезень свідчить про ефективність функціонування Українського морського коридору, який Україна відкрила самостійно незважаючи на постійні обстріли портової інфраструктури, залишаючись топ-експортером агропродукції та гарантом продовольчої безпеки світу. Розподіл обсягу експортованих вантажів через український морський коридор за 10 місяців із загальним обсягом вантажів у 55 млн тонн, частку агропродукції склали 37,4 млн тонн серед усього обсягу вантажів (рис. 1).

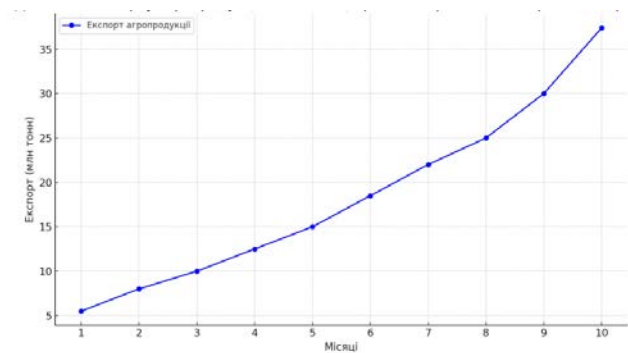


Рис. 1. Динаміка експорту агропродукції за перший квартал 2024 року

На графіку (рис. 2) представлено обсяги перевезень різних видів вантажів «Укрзалізницею» у першому кварталі 2024 року та темпи їхнього росту порівняно з таким же показником 2023 року. Такий порівняльний аналіз особливо важливий у контексті діяльності українського морського коридору, оскільки значна частина вантажів, перевезених залізницею, має міжнародне призначення або походження. Адже вантажі зернових, які становлять значний обсяг експорту через морські порти, показали значний ріст. У перших місяцях 2024 року було перевезено 3.9 млн тонн зернових,

що на 10.2% більше, ніж у 2023 році. Залізниця грає критичну роль у транспортуванні цих вантажів до портів, звідки вони відправляються до міжнародних ринків. Обсяги перевезення залізної та марганцевої руди, які також активно експортуються через морські порти, зросли майже втричі порівняно з попереднім роком. Це вказує на високий попит та ефективність логістичних ланцюжків, що з'єднують залізничний та морський транспорт. Перевезення кам'яного вугілля, яке є важливим елементом енергетичного балансу багатьох країн, зросло на 13%. І саме морські порти України служать важливими вузловими пунктами для експорту цього виду палива.

Ефективність українського морського коридору відіграє ключову роль у цих транспортних операціях, забезпечуючи швидке та безпечне переміщення вантажів. Рекордні показники 2024 року відображають здатність України адаптуватися до складних логістичних викликів і водночас підтримувати високий рівень сервісу, необхідний для підтримки міжнародної торгівлі та продовольчої безпеки.

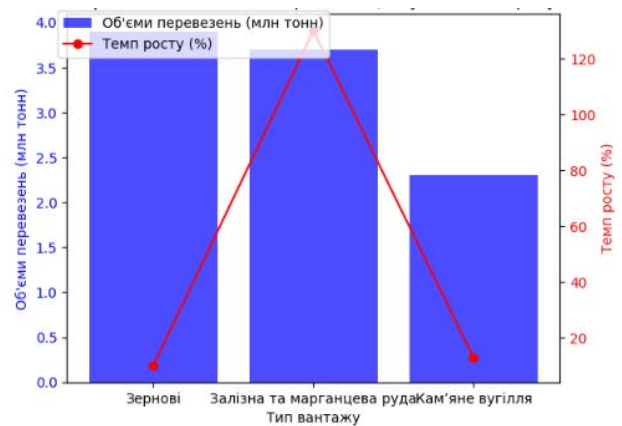


Рис. 2. Перевезення вантажів залізницею в першому кварталі 2024 р.

У процесі євроінтеграції Україна стикається з безліччю викликів і можливостей, особливо в контексті розвитку морської галузі. Впровадження європейських стандартів значно впливає на всі аспекти морського транспорту і логістики, вимагаючи комплексних змін і адаптації до нових вимог.

Вплив європейських стандартів на розвиток морської галузі України Європейські стандарти, особливо ті, що стосуються безпеки та екології, мають значний вплив на морську галузь України. Це включає в себе удосконалення портових операцій, підвищення рівня безпеки на морі та посилення заходів із захисту морського середовища. Впровадження цих стандартів сприяє

підвищенню конкурентоспроможності українських портів на міжнародному рівні, що сприяє залученню іноземних інвестицій.

Адаптація до європейського законодавства потребує значних зусиль з боку України, зокрема й зміни національних норм і стандартів відповідно до європейських регулювань. Це стосується управління портовими операціями, стандартів обробки вантажів, а також вимог до судноплавства. Процес адаптації також передбачає навчання персоналу та оновлення технологічних систем для відповідності новим стандартам.

Одною з основних проблем на шляху євроінтеграції є брак інвестицій у модернізацію портової інфраструктури та оновлення флоту. Недостатнє фінансування призводить до того, що багато проектів з модернізації сповільнюються або не досягають запланованих результатів. Крім того, в Україні існують проблеми з бюрократією та неефективними процедурами, які заважають оперативному впровадженню необхідних змін. Ці виклики потребують комплексного підходу та активної роботи як на рівні державного регулювання, так і на рівні окремих підприємств. Лише скоординовані зусилля всіх зацікавлених сторін дадуть змогу Україні успішно інтегруватися в європейську транспортну систему та реалізувати потенціал своєї морської галузі. В таблиці 1 представлено можливості розвитку та модернізації морської транспортної системи України.

Інтеграція в Транс'європейську транспортну мережу відкриває Україні доступ до європейських транспортних коридорів, що сприяє збільшенню товарообігу та залученню інвестицій у транспортну інфраструктуру. Співпраця з міжнародними логістичними хабами дає змогу оптимізувати маршрути, знижувати вартість і час доставки, а також підвищувати надійність перевезень. Завдяки своєму стратегічному розташуванню між Європою, Азією та Близьким Сходом, Україна має потенціал стати великим транзитним центром

у регіоні. Одне з першочергових завдань – це оновлення та розширення портової інфраструктури, включно з причалами, складськими приміщеннями та логістичними системами. Це дасть змогу збільшити пропускну спроможність портів, прискорити обробку вантажів і знизити витрати на логістику. Залучення іноземних інвестицій потребує стабільного законодавства, прозорості процесів і захисту прав інвесторів.

Держава має працювати над поліпшенням інвестиційного клімату та наданням пільг для іноземних компаній, готових інвестувати в морську інфраструктуру. Оптимізація логістичних процесів і спрощення митних процедур зможе значно скоротити час оброблення вантажів і зробити українські порти конкурентоспроможними на міжнародній арені. Важливо також впроваджувати екологічно чисті технології та стандарти, що допоможе знизити вплив портової діяльності на довкілля й покращити образ України як екологічно відповідальної держави, що є одним з ключових факторів для розвитку економіки.

**Висновки.** Модернізація та адаптація української морської транспортної системи до міжнародних стандартів не тільки поліпшить її функціонування, а й допоможе інтегрувати Україну в глобальні транспортні та торговельні мережі. Перспективи розвитку морської галузі пов'язані з можливостями поліпшення транспортної інфраструктури та логістики, а також із викликами, пов'язаними з необхідністю підвищення екологічної безпеки та забезпечення сталого розвитку. Для досягнення сталого розвитку необхідно сфокусуватися на інноваціях, екології та поліпшенні операційної ефективності. Це охоплює розвиток зелених технологій, підвищення ефективності використання ресурсів і поліпшення умов праці. Таким чином, сталий розвиток морської транспортної системи України вимагає комплексного підходу і скоординованих зусиль усіх зацікавлених сторін – як на національному, так і на міжнародному рівні.

Таблиця 1

### Основні напрямки інновацій та інвестицій у морський транспорт

№	Напрямок	Опис
1	Міжнародні інвестиції та державно-приватне партнерство	Критична роль у модернізації та розвитку морської транспортної інфраструктури. Фінансування, передача знань, технологій та кращих практик. Приклади включають реконструкцію портів та модернізацію терміналів.
2	Екологічні стандарти та інновації	Впровадження стандартів для зменшення впливу на навколишнє середовище. Використання суден на альтернативному паливі, системи управління відходами. Підвищення привабливості для 'зелених' інвестицій.
3	Мультимодальні та інтермодальні перевезення	Оптимізація логістичних ланцюгів через використання різних видів транспорту. Розвиток включає будівництво логістичних центрів, розвиток залізничних шляхів до портів.

**Список літератури:**

1. Гришина, Л. О., Карась, П. М., & Філіпішина, Л. М. (2019). Тенденції, проблеми та перспективи розвитку морегосподарського комплексу України в умовах євроінтеграції. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство*, (24, частина 1), 131–135.
2. Адміністрація морських портів України. (2018). Морська доктрина України на період до 2035 року. Постанова Кабінету Міністрів України від 7 жовтня 2009 р. № 1307 (у редакції постанови від 18 грудня 2018 р. № 1108). *Ліга Закон*. URL: <http://search.ligazakon.ua>
3. Єфімова, Г. В. (2015). Наукові засади стратегії розбудови підприємств суднобудування України. *Економіст*, (6), 17–19.
4. Гуренко, А. В., Щеникова, Е. В., & Євсік, М. С. (2017). Дослідження сучасного потенціалу морегосподарського комплексу України. *Вісник Приазовського технічного університету*, (33), 218–224.
5. Ковальова, О. О. (2003). *Стратегії євроінтеграції: Як реалізувати європейський вибір України* (Монографія). Київ: Інститут держави і права ім. В. М. Корецького НАН України.
6. Манаєнко, І. М., & Просяник, І. В. (2018). Особливості зовнішньоекономічної діяльності вітчизняних підприємств в умовах євроінтеграції. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Економіка*, (18, частина 3), 11–14.
7. The World Bank. (2018). *Doing business 2018: Reforming to create jobs*. URL: <http://www.doingbusiness.org>
8. Державна служба статистики України. (2018). *Транспорт і зв'язок України 2017*. Київ.
9. Melnyk, O., Onyshchenko, S., & Onishchenko, O. (2023). Development measures to enhance the ecological safety of ships and reduce operational pollution to the environment. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 118, 195-206. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2023.118.13>
10. Melnyk, O., Onishchenko, O., Ternovsky, V., Volaynsky, S., & Koryakin, K. (2024). Safe and reliable operation of maritime transport based on integrated systematic safety model. In Babak, V., & Zaporozhets, A. (Eds.), *Systems, Decision and Control in Energy VI* (Vol. 561, pp. 195-206). Cham: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_22)
11. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Rudenko, S., Pavlova, N., & Muradian, A. (2024). Embracing integrated optimization strategies for cost-effective port operations in marine logistics. In Babak, V., & Zaporozhets, A. (Eds.), *Systems, Decision and Control in Energy VI* (Vol. 561, pp. 272-285). Cham: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_27)

**Bernevek T.I., Prokhorov V.K. INTEGRATION OF THE MARITIME TRANSPORT SYSTEM OF UKRAINE INTO GLOBAL TRANSPORTATION NETWORKS**

*The article provides a comprehensive analysis of the current state and prospects for the development of Ukraine's maritime transport system in the context of its integration into global transport networks. In particular, the author emphasizes the key role of maritime transport in ensuring international trade, as well as the strategic importance of Ukraine as a transit country capable of effectively connecting traffic flows between Europe, Asia and other parts of the world. Particular attention is paid to the main problems of the industry, including the aging of the maritime fleet, lack of investment in infrastructure development, and the need to bring national standards in line with European environmental and technical requirements. In the context of integration into the European transport system, there is a need to modernize port infrastructure, which is an integral part of the process of increasing transportation efficiency and reducing logistics costs. The article also examines in detail the role of international investment and public-private partnerships, which can become a driving force for the development of the industry, contributing not only to improving infrastructure but also to increasing the competitiveness of Ukrainian ports on a global level. A special emphasis is placed on the prospects for the development of multimodal transportation, which ensures greater efficiency of logistics operations through the integration of sea, rail and other modes of transport. Analyzed Ukraine's capabilities in the context of its participation in the Trans-European Transport Network, which provides access to key European transport corridors that are crucial for the development of new markets. The article also outlines the main tasks for ensuring the sustainable development of Ukraine's maritime transport system, including improving environmental safety, optimizing logistics procedures, integrating modern technologies, and attracting foreign investment to further strengthen the country's economic potential.*

**Key words:** maritime transport system, European integration, international investments, port modernization, multimodal transportation, environmental standards, logistics, transport network, transit potential, maritime transportation.

УДК 621.3.07

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/13>**Доценко Г.Г.**

Херсонська державна морська академія

**Наговський Д.А.**

Херсонська державна морська академія

## РЕАЛІЗАЦІЯ БЛОКА ПРОСТОРОВО-ВЕКТОРНОЇ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ ДЛЯ СУДНОВИХ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ПРИВОДІВ

В роботі проаналізовано типову модель високошвидкісних суднових електроприводів, а також розглянуті питання застосування просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції (ПВШІМ) для керування роботою інвертора для високошвидкісних приводів.

В даний час найбільш ефективним методом управління напівпровідниковими перетворювачами є широтно-імпульсна модуляція (ШІМ). Застосування ШІМ є прагненням до підвищення коефіцієнту корисної дії при управлінні електроприводами. ШІМ широко реалізована в автомобільних та суднових інверторах, в зарядних пристроях і такі інші. Основною проблемою в подібних системах є питання якості та ефективності процесу векторного регулювання, які майже повністю залежать від швидкодії цифрової системи керування.

Традиційні методи ШІМ засновані на порівнянні сигналу завдання із сигналом лінійної розгортки у результаті чого в обмотках синхронного двигуна (СД) формується послідовність прямокутних імпульсів, скважність яких змінювалася відповідно до сигналу завдання. Однак через вплив електромагнітних процесів (насамперед ЕРС обертання) характер зміни струмів в обмотках не має однозначного зв'язку із законом зміни сигналу керування та сильно залежить від режиму роботи синхронного двигуна.

Завдяки використанню просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції, яка забезпечує більш плавне керування напругою і струмом, що дозволяє точніше регулювати швидкість двигуна. Це особливо важливо в системах з високими вимогами до стабільності швидкості.

У високоточних промислових приводах просторово-векторна широтно-імпульсна модуляція може забезпечити стабільність швидкості з відхиленням не більше 2–3%. У приводах з підтримкою відношення  $U/f$  важливо зберігати постійне співвідношення між напругою і частотою для забезпечення стабільної роботи двигуна. Просторово-векторна широтно-імпульсна модуляція дозволяє краще підтримувати це співвідношення завдяки плавному регулюванню напруги, що знижує відхилення до 2–5%. Це особливо важливо для великих і високошвидкісних суднових електроприводів.

**Ключові слова:** синхронний двигун (СД), головна електрична установка (ГЕУ), головний електричний двигун (ГЕД), просторово-векторна широтно-імпульсна модуляція (ПВШІМ), широтно-імпульсна модуляція (ШІМ), інвертор.

**Постановка проблеми.** Українська суднобудівна галузь має серйозний експортний потенціал, який впливає на розвиток вітчизняної економіки. Водночас в країні внаслідок браку коштів, як з державного бюджету, так і власних коштів підприємств, спостерігається недостатність відповідних досліджень, відсутність узгодженої співпраці науково-дослідних і проектних організацій та підприємств галузі, що негативно впливає на конкурентоспроможність і якість вироблюваної вітчизняними підприємствами продукції.

Основною вимогою до електрообладнання електроенергетичних систем є надійність його роботи в складних умовах мореплавства. Це пояс-

нюється, з одного боку, тим, що основні суднові механізми забезпечені електричною енергією, і тому надійна робота електроустаткування обумовлює як необхідність нормальну їх експлуатацію, так і цілісність судна в цілому; з іншого боку, судно має високу автономність і надовго відривається від баз постачання та ремонтних майстерень, часто має обмежену кількість кваліфікованого обслуговуючого персоналу.

Переваги дизель-електричної силової енергетичної установки з головною електричною установкою (ГЕУ) стосовно до відомих і побудованих на даний момент типів суден, істотно залежать від їх індивідуальних експлуатаційних профілів і їх

цільового призначення, тобто знижений пропульсивний шум і коливання. Наприклад малообертовий головний електричний двигун (ГЕД) дозволяє передачу механічного моменту прямо на гвинт без необхідності застосування редуктора, а капсульні ГЕД більшу частину спектра шуму утворюють за межами корпусу [1].

Сучасний рівень розвитку силових напівпровідникових перетворювачів електроенергії характеризується широким впровадженням мікропроцесорного управління, що сприяє підвищенню ефективності роботи систем в цілому. В даний час найбільш ефективним методом управління напівпровідниковими перетворювачами є широтно-імпульсна модуляція (ШІМ).

Застосування ШІМ є прагнення до підвищення коефіцієнту корисної дії при побудові вторинних джерел живлення електронної апаратури та інших вузлах. ШІМ широко реалізована в зварювальних апаратах, в автомобільних та суднових інверторах, в зарядних пристроях і таке інше. Основною проблемою в подібних системах є питання якості та ефективності процесу векторного регулювання, які майже повністю залежать від швидкодії цифрової системи керування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Особливостям імплементації блоку просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції в програмованій логічній інтегральній схемі (ПЛІС) (англ. programmable logic device, PLD) присвячено багато досліджень, які стосуються реалізації як систем керування трифазними інверторами напруги [1; 2], так і систем керування індукційного двигуна (ІД) [3–4, 6–9]. Зазвичай пропонуються структури блоків ПВШІМ, в яких функції координатних перетворень реалізовано на основі суматорів, компараторів і зсувних регістрів.

Суднові головні електричні двигуни (ГЕД) живляться змінною напругою як по амплітуді так і по частоті від інвертора. В якості інвертора, застосовують автономний інвертор напруги (АІН) (voltage source inverter – VSI) у тому розумінні, що цей інвертор отримує живлення від джерела постійної напруги (DC). Ця постійна напруга забезпечується некерованим діодним випрямлячем і конденсатором (конденсатор напруги DC шини).

Робота АІН (VSI), може бути заснована на двох типах модуляції, гістерезисній модуляції та просторово-векторної модуляції (ПВМ) (space vector pulse width modulation – SVPWM) або інакше – векторної широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

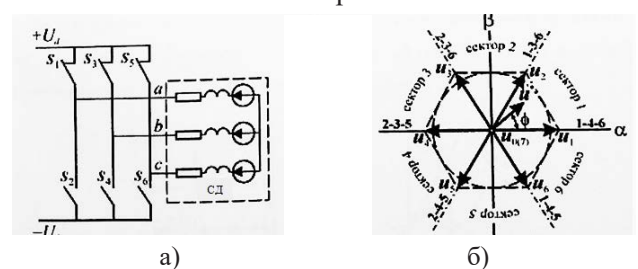
Метод ШІМ був розроблений у середині 90-х років у зв'язку розширенням можливостей

систем мікропроцесорного керування. Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ – англ. pulse-width modulation, PWM), або модуляція за тривалістю імпульсів (англ. pulse-duration modulation, PDM) – процес керування шириною (тривалістю) високо-частотних імпульсів за законом, який задає низько-частотний сигнал.

Традиційні методи ШІМ засновані на порівнянні сигналу завдання із сигналом лінійної розгортки (пилкоподібна напруга) у результаті чого в обмотках СД формується послідовність прямокутних імпульсів, скважність яких змінювалася відповідно до сигналу завдання. Однак через вплив електромагнітних процесів (насамперед ЕРС обертання) характер зміни струмів в обмотках не має однозначного зв'язку із законом зміни сигналу керування та сильно залежить від режиму роботи синхронного двигуна.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є розробка алгоритмів побудови блоку просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції (ПВШІМ) у складі контролера керування роботою інвертора для суднових високошвидкісних приводів.

**Виклад основного матеріалу.** Алгоритм керування ключами ШІМ заснований на формуванні на кожному тимчасовому інтервалі необхідного положення вектора напруги в просторі [4–8]. У випадку аналогового джерела живлення для рішення цього завдання досить сформулювати в кожній обмотці напругу, що відповідає проекції заданого вектора на вісь обмотки. В імпульсних джерелах живлення, до яких відноситься і автономний інвертор (рис. 1 а), можливе формування тільки восьми станів (положень) вектора напруги (рис. 1 б), включаючи два нульові, що сформовані при замиканні непарних ( $u\theta$ ) і парних ( $u7$ ) ключів інвертора. Ці вектори називають базовими векторами.



**Рис. 1. Автономний інвертор та векторна діаграма напруг**

Модуль ненульового базового вектора можна визначити, користуючись поняттям узагальненого вектора. Нехай задано замкнутий стан ключів, наприклад, 1-4-6. В силу симетрії обмоток і з урахуванням напрямку (в фазі а від початку до кінця,



у фазі  $b$  та у фазі  $c$  від кінця до початку) напруги на них складуть:

$$U_a = \frac{2U_d}{3}, U_b = U_c = \frac{U_d}{3} \quad (1)$$

З рівнянь (1) модуль вектора напруги або базового вектора буде дорівнювати:

$$|u| = U_0 = U_d \frac{2}{3} \left[ \frac{2}{3} - \frac{1}{3} \left( \frac{-1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) - \frac{1}{3} \left( \frac{-1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right] = \frac{2}{3} U_d$$

Очевидно, що для всіх інших станів ключів ми одержимо той же результат.

Формування вектора із заданим середнім значенням модуля та просторового кута (див. рис. 2) відбувається почерговим формуванням базових векторів які утворюють границі сектора, у якому перебуває результуючий вектор, а також нульового вектора.

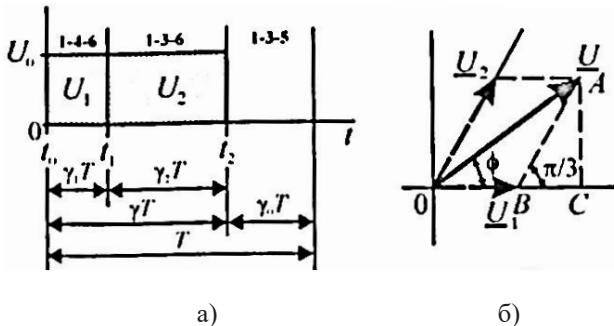


Рис. 2. Формування вектора із заданим середнім значенням модуля та просторового кута

Визначимо тривалість цих інтервалів, вважаючи що модулі граничних векторів дорівнюють середнім значенням. Нехай потрібно сформувати вектор  $u$ . Він перебуває в першому секторі, обмеженому базовими векторами  $u1$  та  $u2$ . На першому інтервалі  $\Delta t_1 = t_1 - t_0$  (рис. 2, а) формується вектор  $u1$  (ключі 1-4-6), на другому інтервалі  $\Delta t_2 = t_2 - t_1$  вектор  $u2$  (ключі 1-3-6), і нарешті, замикаються ключі 1-3-5 і формується коротке замикання стартера синхронного двигуна.

Тоді середні значення граничних векторів будуть дорівнювати:

$$U_1 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_1} U_m dt = U_m \frac{t_1 - t_0}{T} = \gamma_1 U_m = \gamma_1 \gamma_m U_0 = \gamma_1 U_0$$

$$U_2 = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} U_m dt = U_m \frac{t_2 - t_1}{T} = \gamma_2 U_m = \gamma_2 \gamma_m U_0 = \gamma_2 U_0,$$

де  $\gamma_1, \gamma_2$  – відносні тривалості комутації  $\left( \frac{\Delta t_n}{T} \right)$  при заданому модулі результуючого вектора  $U_m = \gamma_m U_0$  з відносним значенням  $0 \leq \gamma_m \leq 1$ ;

$\gamma_1 = \gamma_1 \gamma_m, \gamma_2 = \gamma_2 \gamma_m$  – відносні тривалості комутації при заданому модулі базового вектора  $U_0$ .

Відносні тривалості комутації будуть дорівнювати:

$$\gamma_1 = \gamma_m \frac{2}{\sqrt{3}} \cos \left( \frac{\pi}{6} + \phi \right) = \gamma_m \frac{2}{\sqrt{3}} \sin \left( \frac{\pi}{3} - \phi \right) \quad (2)$$

$$\gamma_2 = \gamma_m \frac{2}{\sqrt{3}} \sin \phi$$

Знаючи відносні тривалості комутації можна знайти відносну тривалість паузи як:

$$\gamma_0 = 1 - \gamma_1 - \gamma_2 = 1 - \gamma,$$

де  $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 = \gamma_m \frac{2}{\sqrt{3}} \cos \left( \frac{\pi}{6} - \phi \right)$  – сумарна відносна тривалість формування ненульових векторів.

Визначимо тепер модуль результуючого вектора через відносні тривалості за рівняннями (2). Із трикутника  $OAB$  (рис. 2, б):

$$OA = |U| = \sqrt{(OB + AB \sin \frac{\pi}{6})^2 + (AB \cos \frac{\pi}{6})^2} = \sqrt{(U_1 + \frac{U_2}{2})^2 + (U_2 \frac{\sqrt{3}}{2})^2} = U_0 \sqrt{(\gamma_1 + \frac{\gamma_2}{2})^2 + (\gamma_2 \frac{\sqrt{3}}{2})^2} = U_0 \gamma_m$$

Таким чином, при прийнятих умовах формування результуючого вектора, його модуль не залежить від аргументу  $\phi$  (рис. 3, а), а годограф являє собою окружність (рис 3, б). Максимальний модуль будь-якого вектора напруги дорівнює модулю базового вектора  $U_{max} = U_0$ .

$$|U_{max}| = U_{max} = U_0 \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{U_d}{\sqrt{3}} \approx 0.577 U_d$$

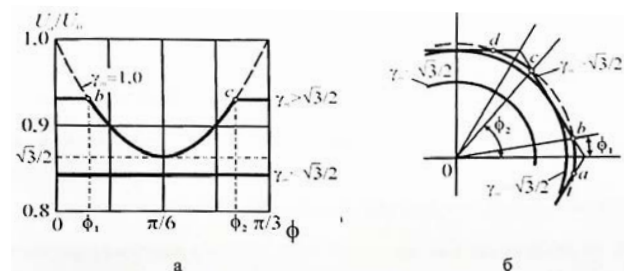


Рис. 3. Функція модуля результуючого вектора від кута – а), її годограф – б)

Базову площу векторів необхідно розбивати на сектори, число яких  $N = 6$ , або кратне 6. Це число визначає крок формування або кількість результуючих векторів, що у свою чергу визначає гармонійний склад вихідної напруги.

Для кожного з  $N$  секторів визначено відносні тривалості інтервалів. За допомогою лінійного розгорнення аналогічному розгорненню ШІМ формуються тимчасові інтервали та здійснюється комутація. На рис. 4 показано один з можливих алгоритмів роботи ШІМ із симетричним і несиметричним сигналом розгортки.

У цьому випадку в межах кожного сектора базових векторів буде формуватися шість результуючих з інтервалом в  $10^\circ$ .

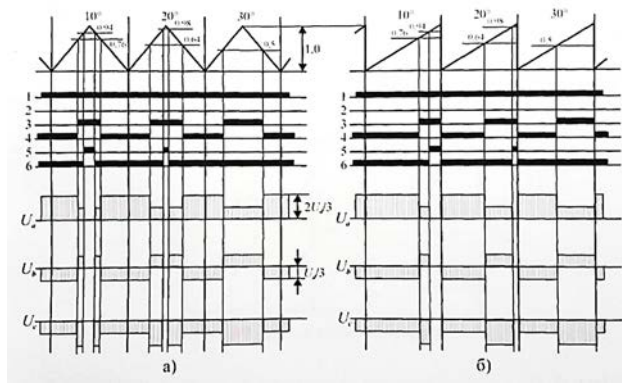


Рис. 4. Алгоритм роботи ШІМ із симетричним а) і несиметричним б) сигналом розгортки

На рис. 4 показані розрахункові рівні сигналів, стану ключів інвертора й вихідні фазні напруги для  $\varphi=10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ .

Іншими словами, процес модуляції розділяється на три тимчасових інтервали [10]. У першому інтервалі замикаються ключі, що відповідають стану вектора початкової границі сектора; у другому – вектору кінцевої границі сектора та в третьому замикаються або всі непарні, або всі парні ключі, формуючи нульовий вектор.

На рис. 5. наведено схему силових ключів 3-фазного автономного інвертора напруги (АІН). А всі можливі вісім базових векторів ШІМ при комутації відповідних силових ключів АІН наведені в таблиці 1, де 1/0 = влк./вимк. стан ключів АІН; +Vdc – напруга на "+" – шині постійного струму; -Vdc – напруга на "-" – шині постійного струму.

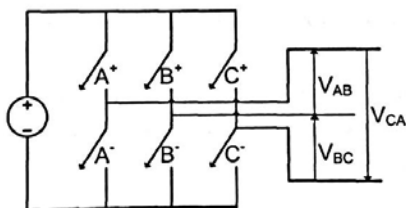


Рис. 5. Схема ключів 3-фазного автономного інвертора напруги

Можливі методи управління, які забезпечать таке виконання ШІМ: керування електроприводом підтримкою відношення  $U/f$ , відоме як Open-Loop Volts/Hertz Control, та регулювання швидкості в замкнутій системі автоматичного керування з компенсацією ковзання, відомий як Closed-Loop Speed Control with Slip Compensation.

Керування електроприводом підтримкою відношення  $U/f$  – цей метод широко застосовується у розімкнених системах автоматичного керування. Магнітний потік статора електродвигуна пропорційний відношенню напруги статора до його частоти.

$$\phi(t) = \int u(t) dt,$$

де  $u(t) = \sqrt{2} \cdot V \sin(\omega \cdot t)$ , тому

$$\phi(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot V}{\omega} \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

Так як двигун живиться від АІН змінною напругою зі змінною частотою, то при підтримці обертаючого моменту на рівні номінального та для виключення насичення заліза магнітної системи, необхідно зберігати постійним відношення В/Гц. Типова характеристика  $U/f$  показана на рис. 6, а.

На рис. 6, б наведена функціональна схема АІН. У зоні нульової частоти, на обмотки статора подається напруга на рівні  $V0$  (бустерна напруга – voltage boost), необхідна для компенсації спадання напруги на активному опорі обмоток статора на низькій частоті.

Керування за законом  $U/f = const$  використовується в електроприводах з низькими вимогами до динамічних показників, такими як насоси або вентилятори, де малі варіації частоти обертання ротора з навантаженням припустимі.

Регулятор напруги (РН) шини DC (DC Bus Voltage Regulator) побудовано за принципом ПІ-регулятора. На рис. 7 показаний РН шини DC.

Вхідними сигналами для регулятора напруги шини DC є бажане значення напруги на шині DC ( $V_{bus}^*$ ) та дійсне значення напруги на шині DC ( $V_{bus}$ ).

Таблиця 1

Базові вектори і відповідні їм комутації силових ключів АІН при ШІМ

Базовий вектор	A+	B+	C+	A-	B-	C-	VAB	VBC	VCA	Вектор
V0(000)	0	0	0	1	1	1	0	0	0	нульовий
V1(100)	1	0	0	0	1	1	+Vdc	0	-Vdc	активний
V2(110)	1	1	0	1	0	1	0	+Vdc	-Vdc	активний
V3(010)	0	1	0	1	0	1	-Vdc	+Vdc	0	активний
V4(011)	0	1	1	1	0	0	-Vdc	0	+Vdc	активний
V5(001)	0	0	1	1	1	0	0	-Vdc	+Vdc	активний
V6(101)	1	0	1	0	1	0	+Vdc	-Vdc	0	активний
V7(111)	1	1	1	0	0	0	0	0	0	нульовий

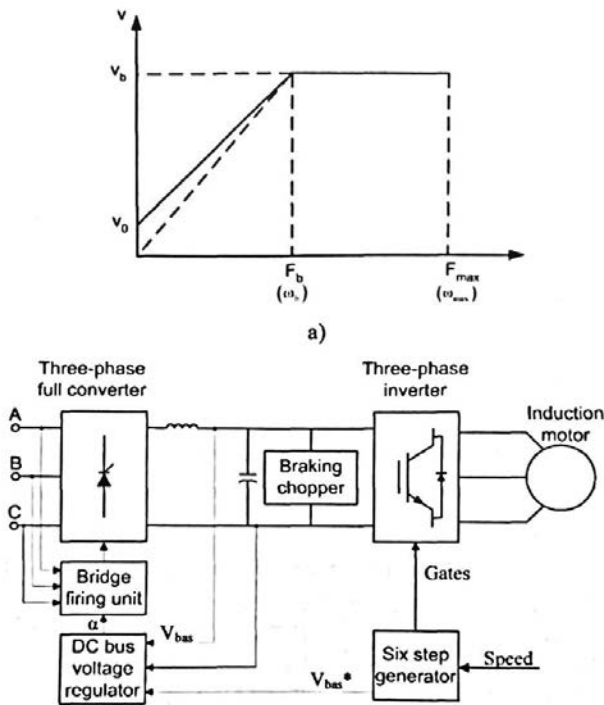


Рис. 6. Типова характеристика U/f (а) та функціональна схема АІН з регулюванням співвідношення (б)

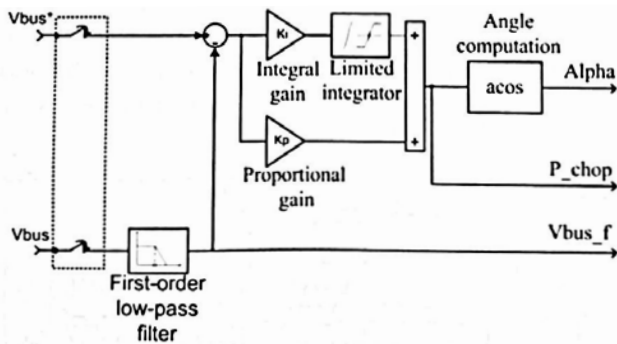


Рис. 7. Регулятор напруги шини DC

Вихідними сигналами є сигнал пропорційний куту відкриття ключів випрямляча (Alpha), сигнал керування гальмівним ключем (P\_chop), та сигнал завдання для вихідної напруги інвертора (Vbus\_f). Процес регулювання напруги наведено на рис. 8.

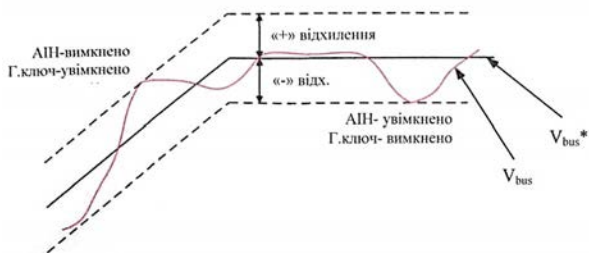


Рис. 8. Процес регулювання ланки постійного струму в АІН

Коли напруга шини зменшується, РН знижує установку кута відмикання випрямляча. Коли напруга шини збільшується, РН збільшує установку кута відмикання випрямляча.

Гальмівний ключ (Braking Chopper) працює із застосуванням гістерезисної логіки. Якщо напруга досягає верхньої гістерезисної межі, РН переходить у гальмовий режим, при цьому тиристорний випрямляч – вимикається і активізується ключ.

У режимі гальмування пропорційна дія РН залишається активною, але інтегральна складова відсутня тому, що динамічні характеристики ключа дуже високі, і інтегральна складова марна.

Коли напруга шини досягає гістерезисної нижньої межі, гальмівний ключ – вимикається, а тиристорний міст активується.

Генератор імпульсів (Six-Step Generator) містить шість компараторів, що виробляють імпульси для формування синусоїдальної напруги живлення двигуна. Допоміжна логіка (speed sign detection) дозволяє виконувати реверс двигуна, інвертуючи дві фази. На вхід генератора надходить сигнал від РН – Vbus\_f та сигнал завдання швидкості двигуна Sp (Speed). На виходах генератора формуються сигнали керування гальмівним ключем Vctrl, сигнал необхідної напруги шини DC – Vbus\*, який надходить до РН, та сигнали керування ключами.

Оскільки система розімкнена, то даний метод може бути використаний лише для пуску, тобто короткочасно, або в системах де не потрібно регулювання швидкості обертання.

Регулювання швидкості в замкнутій системі керування з компенсацією ковзання – цей спосіб полягає в регулюванні швидкості в замкнутій системі управління, з використанням стабілізації ковзання та підтримки співвідношення U/f. На рис. 9 зображено функціональну схему для такого способу управління електроприводом.

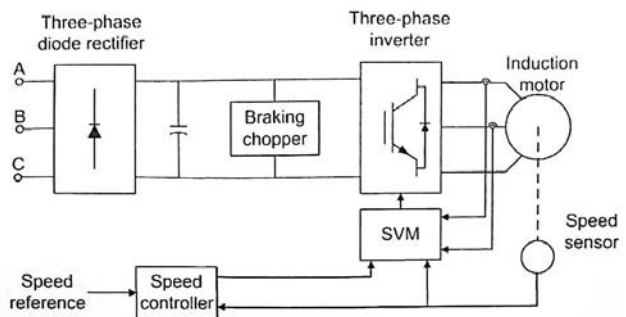


Рис. 9. Функціональна схема АІН з компенсацією ковзання та підтримкою співвідношення U/f=const

При цьому способі управління, задане ковзання сформоване ПІ-регулятором швидкості (РШ) (див.

рис. 10) зрівнюється з миттєвою частотою обертання ротора (вимірюється датчиком швидкості). Сигнал бажаної частоти перетворення від РШ, є вхідною величиною АІН для формування відповідної частоти вихідної напруги. Значення частоти використовується також для обчислення, відповідно до співвідношення  $U/f$  необхідного діючого значення напруги на виході перетворювача.

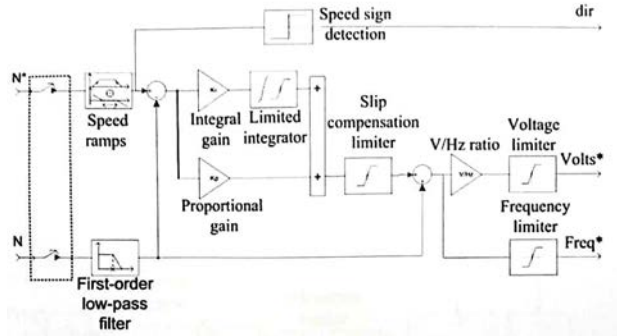


Рис. 10. Регулятор швидкості обертання асинхронного двигуна

Сам РШ складається з таких блоків: ФНЧ 1-го порядку (first-order low-pass filter), задатчика інтенсивності (speed ramps), підсилювача пропорційної складової (proportional gain), підсилювача інтегральної складової (integral gain), інтегратора з обмежувачем (limited integrator), компенсатора обмежувача ковзання (slip compensation limiter), детектора напрямку швидкості (speed sign detection) а також задатчика пропорції  $U/f$  та обмежувачів вихідних сигналів по напрузі та частоті для АІН.

Просторово-векторний модулятор (space vector modulator, SVM), містить сім блоків, показаних на рис. 11, а саме:

Трифазний генератор (three-phase generator) – генерує три синусоїди зі змінною частотою та амплітудою зрушених відносно один одного на кут  $120^\circ$ . Входами є частота та напруга інвертора;

Низькочастотний фільтр шини (low-pass bus filter) – використовується для обмеження швидких перехідних процесів при виміру напруги на шині DC. Цей сигнал використовується для обчислення вектора напруги живлення двигуна;

Альфа-бетта перетворювач (alpha beta transformation) – перетворює змінні трифазної системи у двофазну систему;

Альфа-бетта-векторний сектор використовується для визначення сектору на Альфа-бетта-площини, у якому лежить вектор напруги, Альфа-бетта-площина розділена на шість секторів по  $60^\circ$ ;

Генератор пилкоподібної напруги (ramp generator) – використовується для ШІМ керу-

вання. Використається як генератор розгортай для послідовності перемикачів;

Калькулятор часу перемикачів (switching time calculator) використовується, для обчислення моменту часу вмикання вектора напруги до двигуна. Вхід блоку – сектор, у якому лежить вектор напруги. Таким чином зручно керувати як швидкістю, так і прискоренням обертання ротору.

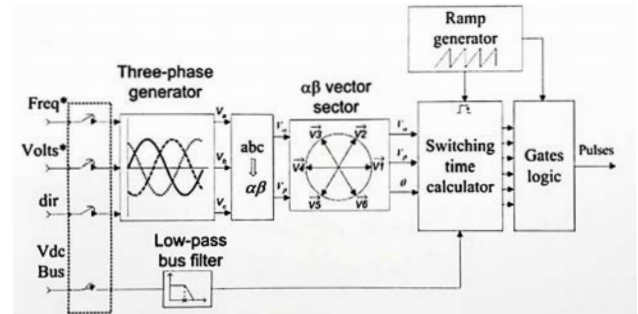


Рис. 11. Просторово-векторний модулятор

Отже, доцільно використовувати стандартну ШІМ з просторово-векторною модуляцією, схема цієї моделі показана на рис. 12.

В моделі АД живиться від АІН. ПІ-регулятор зі зворотнім зв'язком по швидкості використовується для створення магнітного потоку та формування заданого обертаючого моменту для блоку DTC.

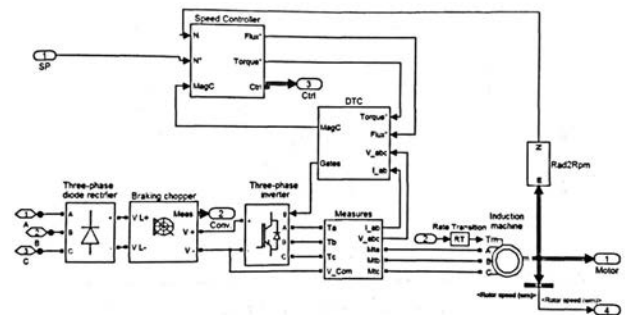


Рис. 12. Схема моделі управління за принципом ШІМ з просторово-векторною модуляцією

Блок DTC обчислює електромагнітний обертаючий момент, оцінює потік і порівнює їх з відповідними заданими значеннями. Сигнали з виходів компараторів зіставляються з таблицею комутації, що генерує перемикаючі імпульси для інвертора.

Силова частина гальмівного блоку містить конденсатор великої ємності шини постійного струму а також ключ та активний опір для динамічного гальмування. Вмикання ключа приєднує гальмівний опір до ланки постійного струму АІН тим самим відбувається поглинання надлишкової енергії при уповільненні двигуна. Система керування гальмівним блоком є повністю самостійною

системою стабілізації напруги ланки постійного струму. Сигнал зворотного зв'язку що пропорційний діючій напрузі ланки постійного струму надходить на елемент зрівняння через фільтр низької частоти  $1/z$  для знешкодження ВЧ компоненти (перешкод). У вузлі зрівняння сигнал зворотного зв'язку порівнюється зі значенням активації ключа. Якщо воно буде перевищено тобто напруга на шині DC зростатиме вище норми то сигнал помилки від підсилювача, надійде до нуля органа ( $>=$ ) і відбудеться ШІМ модуляція цього сигналу відповідно до несучої частоти генератора пили (rampout). Водночас, відбувається контроль напруги на шині DC з боку однопозиційного перемикача з гістерезисною робочою характеристикою що дозволяє або забороняє модуляцію при незначних коливаннях напруги в межах допуску.

Таким чином, маємо результати, які представлені на рис. 13.

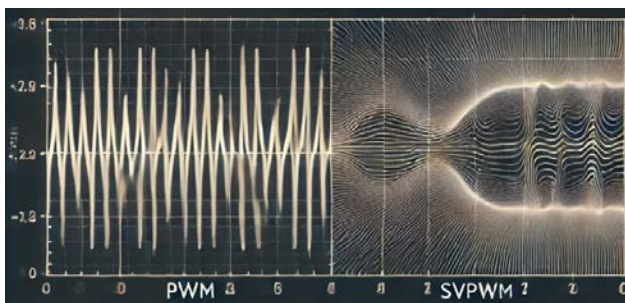


Рис. 13. ШІМ (зліва) та ПВШІМ (з права)

Як видно з рисунку 13, при використанні ШІМ спостерігається високий рівень гармоніки, що

негативно впливає на управління та електричну мережу при роботі з високо потужними двигунами а також низька якість синусоїдального виходу, що зменшує ККД а також підвищує температурний режим машини. Натомість, при використанні ПВШІМ ми бачимо більш плавний вихід та зменшення шумів.

**Висновки.** Використання просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції (ПВШІМ) покращує точність регулювання швидкості до 10–20% у порівнянні з класичним ШІМ, дозволяє зменшити гармонічні спотворення до 50% у порівнянні з ШІМ, що значно знижує втрати і підвищує ефективність. Також, з використанням технології компенсації ковзання точність управління при використанні просторово-векторної широтно-імпульсної модуляції (ПВШІМ) підвищується на 10%. Завдяки використанню просторово-векторної модуляції, ПВШІМ забезпечує більш плавне керування напругою і струмом, що дозволяє точніше регулювати швидкість двигуна. Це особливо важливо в системах з високими вимогами до стабільності швидкості. Наприклад, у високоточних промислових приводах ПВШІМ може забезпечити стабільність швидкості з відхиленням не більше 2–3%. У приводах з підтримкою відношення  $U/f$  важливо зберігати постійне співвідношення між напругою і частотою для забезпечення стабільної роботи двигуна. ПВШІМ дозволяє краще підтримувати це співвідношення завдяки плавному регулюванню напруги, що знижує відхилення до 2–5%. Це особливо важливо для великих і високошвидкісних приводів.

#### Список літератури:

1. Сайт спільного українсько-німецького підприємства «Електронтранс» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://eltrans.electron.ua>.
2. Park, Inverse Park and Clarke, Inverse Clarke Transformations MSS Software Implementation. User guide [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.microsemi.com/documentportal/doc\\_view/132799-park-inverse-park-and-clarke-inverse-clarke-transformations-mss-softwareimplementation-user-guide](https://www.microsemi.com/documentportal/doc_view/132799-park-inverse-park-and-clarke-inverse-clarke-transformations-mss-softwareimplementation-user-guide).
3. Texas Instruments High Voltage Motor Control and PFC Developer's Kit – Retrieved from. <http://www.ti.com/tool/TMDSHVMTRPFCKIT>.
4. Яценко С. І. Контролер для векторного керування індукційним двигуном на базі програмованої логічної інтегральної схеми / С. І. Яценко, В. П. Войтенко, Р. Д. Єршов // Новітні технології сучасного суспільства (НТСС-2017): науково-практична конференція (м. Чернігів, 1 грудня 2017 р.) : тези доповідей. – Чернігів: ЧНТУ, 2017. – С. 45–47.
5. Chen W. Design of an FPGA-based space vector PWM generator for three-phase voltage-sourced inverters / Chen W., Pien C., Feng Y. // Proc. IEEE Power Energy Conf., Dec. – 2008. – P. 584–588.
6. Yang G. The design of SVPWM IP core based on FPGA / Yang G., Zhao P., Zhou Z. // Proc. IEEE Embedded Softw. Syst. Symp. – 2008. – Jul. – P. 191–196.
7. Tzou Y. FPGA realization of space-vector PWM control IC for three-phase PWM inverters / Tzou Y., Hsu H.-J. // IEEE Trans. Power Electron. – 1997. – Vol. 12, no. 6. – Nov. – P. 953–963.
8. Rekha K. R. Vashishtha S. Survey on FPGA Based Space Vector PWM Motion Control / K. R. Rekha // IJAREEIE. – 2015. – Vol. 4, issue 1. – Jan. – P. 282–288.

9. Space Vector Modulation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Space\\_vector\\_modulation](https://en.wikipedia.org/wiki/Space_vector_modulation).

10. How To Generate Sine Samples in VHDL. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://surf-vhdl.com/how-to-generate-sine-samples-in-vhdl/>.

### **Doshchenko H.G., Nahovskyi D.A. IMPLEMENTATION OF THE SPACE-VECTOR PULSE-WIDTH MODULATION UNIT FOR SHIPS HIGH-SPEED DRIVES**

*The paper analyzes a typical model of high-speed marine electric drives, as well as considers the application of space-vector pulse width modulation (SPWM) to control the operation of the inverter for high-speed drives.*

*Currently, the most effective method of controlling semiconductor converters is pulse width modulation (PWM). The use of PWM is a desire to increase the efficiency when building secondary power sources for electronic equipment and other nodes. PWM is widely implemented in automotive and marine inverters, chargers, and so on. The main problem in such systems is the quality and efficiency of the vector control process, which are almost completely dependent on the speed of the digital control system.*

*Traditional PWM methods are based on the comparison of the task signal with the linear sweep signal, as a result of which a sequence of rectangular pulses is formed in the windings of the synchronous motor (SD), the duty cycle of which changes according to the task signal. However, due to the influence of electromagnetic processes (primarily the EMF of rotation), the nature of the change in the currents in the windings does not have an unequivocal relationship with the law of the change of the control signal and strongly depends on the mode of operation of the synchronous motor.*

*Thanks to the use of space-vector pulse-width modulation, which provides smoother control of voltage and current, which allows more precise regulation of motor speed. This is especially important in systems with high requirements for speed stability.*

*In high-precision industrial drives, space-vector pulse width modulation can ensure speed stability with a deviation of no more than 2–3%. In drives with U/f ratio support, it is important to maintain a constant ratio between voltage and frequency to ensure stable motor operation. Spatial-vector pulse-width modulation allows you to better maintain this ratio thanks to smooth voltage regulation, which reduces the deviation to 2–5%. This is especially important for large and high-speed marine electric drives.*

**Key words:** synchronous motor (SM), main electrical installation (MEI), main electric motor (MEM), space-vector pulse-width modulation (SVPWM), pulse width modulation (PWM), inverter.

УДК 656.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/14>**Кириллова О.В.**

Одеський національний морський університет

**Кириллова В.Ю.**

Одеський національний морський університет

**Магамадов О.Р.**

Одеський національний морський університет

## ПОНЯТТЯ «SMART PORT» У КОНТЕКСТІ ГЛОБАЛЬНИХ ТЕНДЕНЦІЙ ІНТЕГРАЦІЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ПОРТОВІЙ ІНДУСТРІЇ

Стаття має на меті проведення аналітичного дослідження джерел, які розглядають поняття «Розумний Порт» («Smart Port»), для створення теоретичної бази майбутніх наукових та прикладних розробок у сфері сучасних портових систем і технологій. В роботі вказується, що термін «Smart Port» з'явився на початку XXI століття і отримав подальше використання у зв'язку з цифровізацією та автоматизацією європейських та азійських контейнерних портів, таких як Гамбург, Роттердам і Сингапур. Перші згадки терміна «Розумний Порт» («Smart Port») у міжнародному контексті почалися з вербальних анонсів відповідних проєктів цих портів, годом ці анонси підтримали відповідні публікації в періодичних виданнях, а пізніше – у наукових статтях. Тому першоджерело терміна «Розумний Порт» («Smart Port») досі залишається невизначеним, і навряд чи колись вдасться точно його встановити. У статті проаналізовано сучасні публікації, які висвітлюють різні аспекти розвитку портової інфраструктури, зокрема використання технологій Big Data, штучного інтелекту (AI), інтернету речей (IoT), цифрових двійників (DT) та блокчейн. У статті наголошується, що термін «Розумний Порт» («Smart Port») у теорії та практиці управління функціонуванням та розвитком портів не з'явився одночасно у конкретному джерелі. Він розвинувся внаслідок глобального загальносвітового тренду на цифровізацію та автоматизацію портової інфраструктури. У статті наведено і детально проаналізовано різні визначення поняття «Розумний Порт» («Smart Port»), надані у наукових джерелах, починаючи з 2014 року. Більшість з них акцентують увагу на автоматизації, впровадженні інтернету речей (IoT), великих даних (Big Data), штучного інтелекту (AI), цифрових двійників (Digital Twin, DT), блокчейн (Blockchain), 5G та інших передових технологій у портовій індустрії. Окремо підкреслюється екологічний аспект, де прогресивні ідеї і новітні технології «Розумних Портів» поєднуються з «Зеленими портами» для зниження енергоспоживання та екологічних впливів. У статті також згадується, що, окрім автоматизації, «Smart Port» включає покращену взаємодію з транспортними мережами та інфраструктурою, зокрема через зв'язки з хінтерлендом і форлендом. Робота підкреслює актуальність розробки стратегії розвитку «Smart Ports» для України, що враховує індивідуальні особливості кожного порту, зокрема у післявоєнній перспективі. Особлива увага приділена питанням цифровізації, автоматизації та екологічної стійкості портів. Стаття також висвітлює необхідність подальших досліджень для визначення стандартизованого підходу до поняття «Smart Port» та адаптації сучасних технологій для підвищення конкурентоспроможності портової галузі. Загалом, стаття акцентує на тому, що розвиток «Розумних Портів» («Smart Ports»), – це не тільки цифровізація та автоматизація, але й комплексний підхід до покращення ефективності, безпеки та екологічності портової інфраструктури.

**Ключові слова:** Smart Port, Розумний порт, інтелектуальні транспортні технології, цифровізація портів, автоматизація портів, роботизація портів, штучний інтелект, інтернет речей, цифровий двійник (близнюк), блокчейн, технологія 5G.

**Постановка проблеми.** Технологічні інновації у XXI столітті стали невід'ємною частиною розвитку транспортних систем і портів.

Сучасні порти, які є ключовими елементами інфраструктурного каркасу світової транспортної

системи і міжнародної торгівлі, зіштовхуються з новими викликами:

- підвищенням обсягів вантажопотоків;
- зростанням екологічних стандартів;
- необхідністю підвищувати ефективність та знижувати витрати.

У відповідь на ці виклики на початку XXI століття на заході виникло поняття «Smart Port», яке точно та однозначно досі не визначено, проте у загальному сенсі базується на використанні інтелектуальних транспортних та інформаційних технологій для оптимізації портових операцій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасних наукових дослідженнях вивчаються різні аспекти функціонування та розвитку портів [1–3]. Розглянуті в них питання є актуальними та відповідають сучасним викликам. Однак, аналіз новітніх технологій у цих роботах має оглядовий характер і охоплює різні сфери транспортного бізнесу, що пов'язані з роботою портових систем. Загалом, результати досліджень є цінними в контексті системного підходу до впровадження сучасних технологій «Smart Port».

В роботі [4]: розглянуто сучасні технології, на базі яких розробляються, впроваджуються та ефективно функціонують різні «Smart Port» ініціативи у транспортній галузі; розглянуто інноваційні технології, які використовуються у сучасних портах і дозволяють ідентифікувати їх у якості «Розумних» («Smart Ports»). Серед основних в роботі визначено наступні технології, які використовують у своїй діяльності сучасні «Розумні Порти»: технологія Великих даних (Big Data); штучний інтелект (Artificial Intelligence (AI)); інтернет речей (Internet of Things (IoT)); технологія «Цифровий двійник» (Digital Twin (DT)); блокчейн (Blockchain). В роботі [4] досліджено досвід впровадження новітніх технологій у виробничу діяльність провідних портів світу, які вже сьогодні набули статусу «Smart Port», але мають різні стратегії розвитку; актуалізовано питання необхідності та доцільності розробки «Smart Port» Стратегії розвитку в цілому портової галузі України та персоналізованих дорожніх карт розвитку кожного українського порту у післявоєнній перспективі.

В роботі [4] зазначено, що сьогодні майбутнє глобального морського бізнесу і транспортної логістики змінюють «Розумні Порти» («Smart Ports») та інноваційні технології, завдяки яким такі порти з'являються та ефективно функціонують. У дослідженні підкреслено, що поняття «Розумний Порт» («Smart Port») охоплює багато різних аспектів залежно від того, яку стратегію розвитку обирає його керівництво та органи влади. Досліджені в роботі технології є ключовими стовпами, на які сьогодні спирається будь-який «Розумний Порт». Ці технології є першочерговими інструментами, на які повинен орієнтуватися порт при

розробці своєї стратегії розвитку у напрямку автоматизації та цифровізація. У післявоєнній перспективі в рамках концепції загальної транспортної політики України, доцільно звернути увагу та направити зусилля на розробку офіційної «Smart Port» Стратегії розвитку портової галузі України. Причому така «Smart Port» Стратегія повинна містити персоналізовані дорожні карти майбутнього розвитку кожного українського порту, орієнтуючись на їхню цифровізацію, забезпечення конкурентних переваг, безпеку судноплавства, соціальний та екологічний аспекти функціонування портів [4].

Поряд з цим, слід зазначити, що існують різні інтерпретації самого терміну «Розумний Порт» («Smart Port»), але досі ні у національному законодавстві, ні у міжнародному правовому полі немає стандартного та задокументованого визначення відповідного поняття.

**Постановка завдання.** Метою статті є аналітичне дослідження джерел, що розглядають поняття «Розумний Порт» («Smart Port»), для створення теоретичної бази майбутніх наукових та прикладних розробок у сфері сучасних портових систем і технологій.

**Виклад основного матеріалу.** Вперше термін «Розумний Порт» («Smart Port») на міжнародній арені почали використовувати на початку XXI ст., коли великі контейнерні порти Європи та Азії зіткнулися з необхідністю цифровізації своїх операцій. Проте точне першоджерело терміну «Розумний Порт» («Smart Port») не є однозначно визначеним і, ймовірно, ніколи не буде остаточно встановленим. Оскільки перші згадки терміна «Розумний Порт» («Smart Port») у міжнародному контексті почалися з вербальних анонсів, що описували проекти таких глобальних контейнерних портів, як Гамбург, Роттердам та Сінгапур. Пізніше такі анонси знайшли відображення спочатку у періодичних виданнях, а потім і в наукових публікаціях. Ці порти стали прикладами перших у глобальному портовому секторі значних ініціатив із застосування передових технологій, що базуються на цифровізації, автоматизації та роботизації. Більш широке застосування термін «Розумний Порт» («Smart Port») отримав у 2010-х рр. завдяки появі та розвитку окремих локальних цифрових рішень і автоматизованих систем у цих портах. Таким чином слід наголосити на тому, що термін «Розумний Порт» («Smart Port») у теорії та практиці управління функціонуванням та розвитком портів не з'явився одноментно у конкретному джерелі. Він розвинувся



внаслідок загальносвітового тренду на цифровізацію та автоматизацію портової інфраструктури.

Незважаючи на актуальність і широке використання терміна «Розумний Порт» («Smart Port»), на сьогодні відсутнє точне, загальноприйняте та формально задокументоване його визначення. Кожен представник професійної спільноти та наукової сфери пропонує власне тлумачення цього поняття, надаючи йому індивідуальний зміст. У цих визначеннях можна помітити як спільні риси, так і суттєві відмінності, що підкреслюють багатогранність підходів і перспектив щодо концептуалізації «Розумних Портів» («Smart Ports»).

Наведемо у хронологічному порядку різні, зокрема закордонні джерела, в яких розглядалося поняття «Розумний Порт» («Smart Port»).

Одну з перших спроб надати визначення поняттю «Розумний Порт» («Smart Port») ми зустрічаємо в роботі [5], яка датована 2014 р. В ній «Розумний порт» визначено як порт, що характеризується автоматизацією, високою продуктивністю та має систему портових операцій, портове обладнання та портову інфраструктуру.

В роботі [6], що вийшла у 2018 р., автори розглядають «Розумний Порт» («Smart Port»), як порт, що прагне підвищити продуктивність і ефективність шляхом впровадження автоматизованої системи з використанням екологічно чистих технологій, а також технологій «високого рівня», таких, як IoT, Big Data тощо.

Тим часом у публікації [7], що також побачила світ у 2018 р., авторське бачення «Розумного порту» описано, як повністю автоматизованого порту, робота якого базується на технологіях Інтернет речей (IoT), і передбачає підключення мережи розумних датчиків, приводів, бездротових пристроїв до центрів обробки даних, що дозволяє портовим адміністраціям в реальному часі управляти портовими процесами і надавати основні послуги швидше та ефективніше. Автори цієї роботи визначають «Розумний порт» як порт, який характеризується автоматизацією, високою продуктивністю та має систему портових операцій, портове обладнання та портову інфраструктуру.

Наявність обов'язкової автоматизації портів при визначенні поняття «Smart Port» також фігурує в роботі [8], яка опублікована у 2018 р. Крім того, ця робота має на меті «визначити основні проблеми, які спонукали дослідників до думки про "Smart Port"». З іншого боку, автор представляє моделювання концепції «Smart Port», визначаючи його основні складові, а також важливі компоненти для успіху кожного елемента. На

думку авторів, «Розумний порт» спирається на взаємозв'язок між інформаційними системами, центрами обслуговування даних, кібербезпекою, автоматизованим обладнанням та автоматизованими термінальними операціями для покращення надійності їх виконання, безпеки обміну інформацією та прийняття рішень у реальному часі [8].

В роботі [9], що видана у 2018 р., «Розумні порти» визначаються як такі, що базуються на цифрових технологіях, стають більш продуктивними, ефективними та зручними для користувача, а також відповідають екологічним вимогам і вимогам безпеки. Технології розумних портів включають низку цифрових послуг, включаючи вбудовані сенсорні мережі, системи призначення вантажівок та обмін інформацією на основі платформ.

Технологічні аспекти «Розумних портів» підкреслюються і в роботі [10], яка опублікована у 2018 р. Тут «Розумний порт» визначається, як порт, що належним чином оснащений такими технологіями, як датчики, хмарні обчислення, туманні обчислення, Інтернет речей (IoT), роботи, радіочастотна ідентифікація (RFID), а також керування та аналіз великих даних. Також в цій публікації використовується поняття «Інтелектуальний порт» («Intelligent Port»), як синонім поняття «Розумний порт» – порт, який має здатність швидко й ефективно вирішувати проблеми попередніх поколінь портів [10]. «Загалом це допомагає портовим адміністраціям і операторам терміналів добре та швидко адаптуватися до мінливих умов порту. Наприклад, шляхом моніторингу проаналізованих даних із системи автоматичної ідентифікації (AIS) вони можуть приймати кращі рішення в режимі реального часу. Це також має деякі переваги для судноплавних компаній, оскільки вони можуть скоротити свої витрати, наприклад, за рахунок скорочення часу очікування. Нарешті, «Розумний порт» враховує свій вплив на навколишнє середовище та зменшує його за допомогою енергозберігаючого підходу» [10].

В роботі [11], що опублікована у 2019 р., зазначено, що «Smart Port» «базується на систематичному, стратегічному та соціальному мисленні, що включає інтегроване застосування хмарних обчислень, великих даних, Інтернету речей, мобільного Інтернету, інтелектуального зондування та інших інформаційних технологій наступного покоління для досягнення комплексного сприйняття, повсюдного підключення, інтелектуальної інтеграції, глибокої обробки та спільного використання різних елементів підключених ресурсів в екосистемі організації порту, щоб зрештою

створити сучасний порт, який є розумнішим, безпечнішим, ефективнішим, гнучкішим і екологічнішим». Автори роботи наголошують, що «Smart Port» відрізняється відмінною роботою, відкритою екосистемою та активним розширенням сталого інноваційного бізнесу. «Розумні порти» намагаються застосувати передові інформаційні технології, а також автоматизоване та інтелектуальне механічне обладнання для повсякденного виробництва та управління експлуатаційною роботою портів. «Розумні порти» забезпечують безперебійне з'єднання та синергію між транспортними засобами, суднами, людьми, вантажами та різними системами порту, підвищуючи ефективність його щоденної роботи, раціоналізуючи портове енергозбереження, скорочуючи викиди та збільшуючи його конкурентні переваги.

У статті [12], яка датована 2019 р., автори поєднують концепцію «Розумного порту» («Smart Port») з концепцією «Зеленого порту» («Green Port»). Автори вважають, що це нероздільні елементи, які підсилюють і розвивають один одного. Відповідно до міркувань авторів, розвиток «Зелених портів» є основною метою низького енергоспоживання, низьких викидів і низького забруднення, тоді як розвиток «Розумних портів» базується на «розумних» інноваційних технологіях для підвищення ефективності та посилення конкурентоспроможності. Автори вважають, що «Зелений» розвиток є важливою концепцією для розвитку «Розумних портів». Без концепції «Зеленого розвитку» режим «Розумного порту» було б важко реалізувати, і в той же час застосування технологічних інновацій у «Розумному порту» є ключовим засобом досягнення екологічного, тобто «Зеленого порту».

У свою чергу, в роботі [13], яка опублікована у 2020 р., об'єднано концепції «Розумного порту» («Smart Port») та «Розумного міста» («Smart Citie»). В цій публікації «Розумний порт» («Smart Port») визначений як такий, що є частиною «Розумного міста» («Smart Citie») та має на меті використання технологічних інновацій для покращення своєї діяльності та портових послуг. У свою чергу, у поєднанні з «Розумним містом» порт забезпечує розвиток міст і регіонів шляхом підвищення конкурентоспроможності міжнародної торгівлі. «Розумна» портова екосистема також означає зменшення споживання енергії та заторів.

У 2020 р. Азіатський банк розвитку (ADB) у своєму дослідженні «Розумні порти в Тихоокеанському регіоні» [14] визначає «Розумні порти», як порти, що віддають перевагу операційній ефек-

тивності, керуються технологією, є стійкими до змін і криз, підвищують безпеку технологічних операцій, є енергоефективними та прагнуть до сталого розвитку.

Поряд з тим у 2021 р. Економічна і соціальна комісія ООН для Азії та Тихого океану (ESCAP) у своєму дослідженні «Політика розвитку розумних портів в Азії та Тихоокеанському регіоні» [15] також вказує на елементи автоматизації, оскільки автори підкреслюють, що «Розумні порти» («Smart Ports») або «Інтелектуальні порти» («Intelligent Port») слід розуміти як ті типи портів, що прагнуть до автоматизації всіх технологічних операцій. Такі порти прагнуть обробляти портові засоби та виконувати портові операції, оптимізувати вантажопотоки і потоки транспортних засобів за рахунок використання нових і передових технологій. Як наслідок цієї діяльності, порт стає автономним портом з інтегрованим управлінням інформацією, раціональним прийняттям рішень та ефективним використанням ресурсів за допомогою інноваційних технологій. «Розумні порти» також означають покращення бізнес-процесів, скорочення витрат і часу обробки, підвищення продуктивності та ефективності виробничої діяльності порту та мінімізацію впливу порту на навколишнє середовище.

В роботі [16], що вийшла у 2021 р., автори зосереджують увагу на тому, що «Розумний порт» («Smart Port») в управлінні своєю діяльністю використовує інноваційні технології, такі як «Digital Twin» (DT). На думку авторів, «це може допомогти портовій галузі покращити ефективність цифровізації та перейти до нової ери». У свою чергу, в роботі наголошено, що для того, щоб стати «Розумним портом», порт повинен розробити такі рішення, що здатні подолати наступні проблеми, з якими стикаються порти, наприклад, обмежений простір, тиск продуктивності, суворі екологічні вимоги, ризики безпеки.

В роботі [4], яка опублікована у 2024 р., вітчизняні автори надали наступне визначення: «В загальному сенсі «Розумний Порт» («Smart Port») – це сучасний і технологічно передовий порт, який використовує новітні технології, водночас більше дбаючи про безпеку судноплавства, екологію навколишнього середовища і морського простору. «Розумні Порти» є цифровими, автоматизованими, екологічно чистими, більш пов'язаними з інфраструктурою та мережами суміжних видів транспорту, промисловим середовищем і ресурсами, тобто зі своїми хінтерлендом (hinterland) та форлендом (foreland)» [4]. В цій

роботі автори також зазначають, що технологічними передумовами, які стали фундаментом для зародження поняття «Smart Port» та відповідної концепції, стали ключові технологічні розробки, які вже знайшли своє практичне втілення у практиці функціонування сучасних портів. Ці розробки в частині їх впровадження у діяльність транспортних підприємств і портів детально розглянуто в роботі [4] та базуються на використанні: технології великих даних (Big Data); штучного інтелекту (Artificial Intelligence (AI)); інтернету речей (Internet of Things (IoT)); технології «Цифровий двійник (близнюк)» (Digital Twin (DT)); технології блокчейн (Blockchain); технології 5G. Наприклад:

1. Великі дані та аналітика. Порти почали впроваджувати аналітичні системи, що дозволяють ефективно використовувати отримані дані для прогнозування обсягів вантажу, оптимізації вантажопотоків і транспортних потоків, а також управління ресурсами.

2. Штучний інтелект (AI). Здатність автоматизувати процеси, пов'язані з обробкою вантажів, навігацією, управлінням персоналом та технічним обслуговуванням, відкрила нові можливості для підвищення ефективності портів.

3. Інтернет речей (IoT). Підключення пристроїв і датчиків до єдиної мережі для збору та аналізу даних в реальному часі стало базисом для управління портовими процесами.

4. Блокчейн. Безпека та прозорість ланцюгів постачання за допомогою блокчейну сприяють покращенню взаємодії між різними учасниками портових операцій.

5. Автономні транспортні засоби та роботи. Впровадження автономних кранів, вантажівок і систем розвантаження скоротило час простою суден і знизило витрати на робочу силу.

Сьогодні впровадження «Smart Port» технологій в портах зіштовхується з цілою низкою труднощів, серед яких можна виділити кілька ключових аспектів:

1. Інфраструктурні обмеження. Багато портів мають застарілу інфраструктуру, яка не завжди готова до інтеграції інноваційних технологій. Оновлення інфраструктури вимагає значних фінансових вкладень, а також часу на модернізацію, що часто є проблематичним у великих транспортних вузлах і портах.

2. Сумісність технологій. «Smart Port» передбачає інтеграцію численних цифрових і автоматизованих систем, що вимагає забезпечення сумісності між різними технологічними платформами.

Це включає уніфікацію стандартів для обміну даними та взаємодії між системами різних учасників транспортного ланцюга. Крім того, для того щоб різні порти могли ефективно взаємодіяти в глобальній мережі, необхідна стандартизація технологічних рішень.

3. Кібербезпека. Збільшення обсягу цифрових даних і використання штучного інтелекту в управлінні портовими процесами підвищує ризики кібератак. Захист інформаційних систем стає пріоритетним завданням, особливо в умовах глобалізації і зростання кількості взаємопов'язаних систем.

4. Кваліфікація кадрів. Впровадження «Smart Port» технологій вимагає висококваліфікованих фахівців, здатних працювати з новітніми системами автоматизації та цифровими платформами. Нестача кадрів зі спеціалізованими навичками може стати серйозним обмеженням для ефективного впровадження таких технологій.

5. Фінансові інвестиції. Модернізація портів за допомогою «Smart Port» технологій потребує значних фінансових вкладень. Пошук фінансування, особливо в умовах економічної нестабільності, може стати серйозним викликом для багатьох портів.

6. Регуляторні бар'єри. Законодавча база щодо цифровізації та автоматизації портів часто відстає від темпів технологічного розвитку. Відсутність єдиних регламентів і нормативів для впровадження «Smart Port» технологій може уповільнювати цей процес.

Подолання цих викликів вимагає комплексного підходу, активної співпраці між урядами, бізнесом, міжнародними організаціями, науковою та освітньою спільнотою для забезпечення сталого розвитку «Розумних» портових систем.

Перспективи розвитку «Розумних портів» («Smart Ports») тісно пов'язані зі стратегіями глобальної цифровізації та розвитком інноваційних транспортних технологій. Порти майбутнього будуть інтегровані в єдину мережу логістичних ланцюгів, де управління вантажопотоками відбуватиметься автоматично, з мінімальним втручанням людини.

### Висновки.

1. Сучасні порти стикаються з новими викликами, такими як збільшення обсягів вантажопотоків, підвищення екологічних стандартів та вимоги до підвищення ефективності. Технологічні інновації, зокрема «Smart Port» рішення, є важливим засобом для вирішення цих проблем.

2. Перші згадки терміна «Розумний Порт» («Smart Port») у міжнародному контексті почалися з вербальних анонсів проєктів таких контейнерних

портів, як Гамбург, Роттердам і Сингапур. Згодом ці анонси підтримали відповідні публікації в періодичних виданнях, а пізніше – у наукових статтях. Тому, незважаючи на широке використання терміна «Розумний Порт» («Smart Port»), його точне першоджерело залишається невідомим і, ймовірно, ніколи не буде остаточно встановленим.

3. Термін «Розумний Порт» («Smart Port») у теорії та практиці управління функціонуванням та розвитком портів не з'явився одночасно у конкретному джерелі. Він розвинувся внаслідок загальносвітового тренду на цифровізацію та автоматизацію портової інфраструктури.

4. Поняття «Розумний Порт» базується на використанні таких передових технологій, як великі дані (Big Data), штучний інтелект (AI), інтернет речей (IoT), блокчейн (Blockchain), цифрові двійники (Digital Twin, DT), 5G тощо. Вони сприяють оптимізації операцій і підвищенню продуктивності портів.

5. Попри зростаюче використання терміну «Розумний Порт» («Smart Port»), у науковій та діловій літературі, а також у законодавстві, немає єдиного загальноприйнятого та стандартизованого визначення. Різні дослідники та практики вносять свої інтерпретації у це поняття.

6. У наукових дослідженнях існують різні визначення поняття "Smart Port", з акцентом на автоматизацію, інтеграцію цифрових технологій та екологічність. Таким чином поняття «Smart Port» сьогодні є результатом поєднання новітніх технологій та актуальних викликів транспортної індустрії. У свою чергу, подальший розвиток «Розумних Портів» («Smart Ports»), – це не тільки цифровізація та автоматизація, але й комплексний підхід до покращення ефективності, безпеки та екологічності портової інфраструктури.

7. Провідні контейнерні порти світу, такі як Гамбург, Роттердам та Сингапур, першими застосували цифровізацію, автоматизацію та роботизацію, що визначило їх як «Smart Ports».

8. Досвід впровадження «Smart Ports» технологій у провідних портах світу (Гамбург, Роттердам, Сингапур) демонструє успішні моделі цифровізації, які можна використовувати як приклади для розвитку українських портів.

9. Для успішного впровадження концепції «Розумних Портів» («Smart Ports») в Україні необхідно розробити національну стратегію розвитку портової інфраструктури післявоєнного періоду, враховуючи індивідуальні особливості кожного порту.

#### Список літератури:

1. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. Діджиталізація як шлях до забезпечення екологічності, безпеки і сталого функціонування морської галузі. Інтелектуальні транспортні технології: праці 2 міжнар. наук.-техн. конф. (Харків, 27-29 квітня 2021 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2021. С. 21-23. URL: <http://itt.kart.edu.ua/images/Tezu2021/TezuITT2021.pdf>.
2. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. Інноваційні робототехнічні технології для морської індустрії. Інтелектуальні транспортні системи: екологія, безпека, якість, комфорт: праці міжнародної конференції (Київ, 29-30 листопада 2022 р.). Київ: НТУ, 2022. С. 72-76. URL: <https://drive.google.com/file/d/1n5wjmM0O7g8Cvk-CQwvqmjvHVDfS6Gtk/view>.
3. Кириллова В.Ю., Кириллова О.В. Основні технологічні тренди у сфері інформаційного забезпечення систем доставки вантажів у діяльності транспортно-експедиторських компаній. Науковий журнал «Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки». 2023. Том 34 (73) № 6. Видавничий дім «Гельветика». С. 244-250. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.6/36>.
4. Kyryllova O., Kyryllova V., Mahamadov, O., & Romakh, V. (2024). Smart port: the latest technologies and international experience in their implementation (Smart port: новітні технології і міжнародний досвід їх впровадження). *Transport Development*, 2024. №(2(21)), 62-74. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2024.2-21.06>.
5. Cho, S.W., Won, S.H. 2014. A study on the future development plan of container in Korea by analysing the cases of automated container terminals in Europe. *J. Eur. Union Stud*, 38, 205-236.
6. Ki Jun, W., Lee, M.K, Young Cho, J. 2018. Impact of the smart port industry on the Korean national economy using input-output analysis. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 118, 480-493. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.10.004>.
7. Yang Y., Zhong M., Yao H., Yu F., Fu X., Postolache O. 2018. Internet of things for smart ports: Technologies and challenges. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 21(1), 34-43. <https://doi.org/10.1109/MIM.2018.8278808>.
8. Douaioui K., Fri M., Mabrouki C. 2018. Smart port: Design and perspectives. In: 2018 4th International Conference on Logistics Operations Management (GOL). IEEE, 1-6. <https://doi.org/10.1109/GOL.2018.8378099>.
9. Riedl, J., Delecncios, F.X., Rasmussen, A. 2018. To Get smarts, Ports go to Digital. Boston Consulting Group.

10. Rajabi, A., Saryazdi, A., Belfkih, A., Duvallet, C. 2018. Towards Smart Port: An application of AIS Data. IEEE, 1414-1421. <https://doi.org/10.1109/HPCC/SmartCity/DSS.2018.00234>.
11. Tian, Y., Hua, C., Zhu, Y. 2019. Simplified neutrosophic exponential similarity measures for evaluation of smart port development. Symmetry, 11(4). <https://doi:10.3390/sym11040485>.
12. Chen, J., Xue, K., Ye, J., Huang, T., Tian, Y., Hua, C., Zhu, Y. 2019. Simplified neutrosophic exponential similarity measures for evaluation of smart port development. Symmetry, 11(4). <https://doi:10.3390/sym11040485>.
13. Yau, K.L.A., Peng, S., Qadir, J., Low, Y.C., Ling, M.H. 2020. Towards Smart Port Infrastructures: Enhancing Port Activities Using Information and Communications Technology. IEEE, 8, 83387-83404. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990961>.
14. Asian Development Bank (ADB). 2020. Smart ports in the Pacific Asian Development Bank. Tokyo.
15. Economic and Social Commission for Asia and the Pacific (ESCAP). 2021. Smart ports development policies in Asia and the Pacific. United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific. Bangkok.
16. Wang, K., Hu, Q., Zhou, M., Zun, Z., Qian, X. 2021. Multi-aspect applications and development challenges of digital twin-driven management in global smart ports. Case Studies on Transport Policy, 9(3), 1298-1312.

**Kyrylova O.V., Kyrylova V.Yu., Mahamadov O.R. THE CONCEPT OF “SMART PORT” IN THE CONTEXT OF GLOBAL TRENDS OF INTEGRATION OF INTELLIGENT TRANSPORT AND INFORMATION TECHNOLOGIES IN THE PORT INDUSTRY**

*The purpose of the article is to carry out an analytical study of sources that consider the concept of "Smart Port" ("Smart Port"), in order to create a theoretical basis for future research and scientific development in the field of modern port systems and technologies. The work indicates that the term "Smart Port" appeared at the beginning of the XXI century and was further used in connection with the digitalization and automation of European and Asian container ports, such as Hamburg, Rotterdam and Singapore. However, the exact origin of the term "Smart Port" has not yet been determined. The article analyzes modern research and publications that highlight various aspects of port infrastructure development, including the use of Big Data, artificial intelligence (AI), Internet of Things (IoT), digital twins (DT) and blockchain technologies. The article emphasizes that the term "Smart Port" in the theory and practice of managing the operation and development of ports did not appear all at once in a specific source. It developed as a result of the global trend towards digitization and automation of port infrastructure. The article presents and analyzes in detail various definitions of the concept of "Smart Port" ("Smart Port"), provided in scientific sources, starting from 2014. Most of them focus on automation, implementation of the Internet of Things (IoT), big data (Big Data), artificial intelligence (AI), digital twins (Digital Twin, DT), blockchain (Blockchain), 5G and other advanced technologies in the port industry. The environmental aspect is emphasized separately, where progressive ideas and the latest technologies of "Smart Ports" are combined with "Green Ports" to reduce energy consumption and environmental impacts. The article also mentions that, in addition to automation, the "Smart Port" includes improved interaction with transport networks and infrastructure, particularly through hinterland and foreland connections. The work emphasizes the relevance of developing a "Smart Ports" development strategy for Ukraine, which would take into account the individual characteristics of each port, particularly in the post-war perspective. Special attention is paid to issues of digitization, automation and environmental sustainability of ports. The article also highlights the need for further research to define a standardized approach to the concept of "Smart Port" and adapt modern technologies to increase the competitiveness of the port industry. In general, the article emphasizes that the development of "Smart Ports" is not only digitalization and automation, but also a comprehensive approach to improving the efficiency, safety and environmental friendliness of the port infrastructure.*

**Key words:** Smart Port, Intelligent port, intelligent transport technologies, port digitalization, port automation, port robotics. artificial intelligence, Internet of things, digital double (twin), blockchain, 5G technology.

УДК 656.61

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/15>

**Логінов О.В.**

Одеський національний морський університет

**Мельник О.М.**

Одеський національний морський університет

**Волошин А.О.**

Одеський національний морський університет

**Кучеренко В.Ю.**

Одеський національний морський університет

**Волошин Д.А.**

Одеський національний морський університет

**Варлан Т.Є.**

Одеський національний морський університет

## АНАЛІЗ ВИКИДІВ ТА СТРАТЕГІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНИХ АСПЕКТІВ РОБОТИ СУДНА

Одним з ключових завдань сучасної морської індустрії є дотримання міжнародних екологічних стандартів, зокрема Додатку VI МАРПОЛ та вимог зон контролю викидів (ЕСА). У статті розглядаються екологічні аспекти роботи судна що основним елементом морської транспортної системи. Зокрема досліджується вплив маршруту переходу судна та величина споживання палива на обсяги викидів шкідливих речовин, таких як діоксид вуглецю ( $CO_2$ ), оксиди азоту ( $NOx$ ) та оксиди сірки ( $SOx$ ). Для вирішення цієї проблеми в статті розроблено модель оптимізації маршруту переходу судна, яка враховує не лише витрати палива, але й метеорологічні умови, швидкість судна та рівень споживання палива. Дослідження базується на комплексному аналізі викидів на основі реальних даних про роботу суден, що дозволяє оцінити вплив швидкості, відстані та погодних факторів на викиди  $CO_2$ ,  $NOx$  та  $SOx$ . Модель мінімізує викиди та досягає більшої паливної ефективності за рахунок оптимізації швидкості судна в межах 6–7 вузлів, що значно зменшує споживання палива та викиди. Крім того, дослідження показує, що погодні умови, такі як вітер і висота хвиль, можуть впливати на енергоефективність суден, вимагаючи додаткових коригувань маршруту. Отримані результати можуть бути використані на практиці судноплавними компаніями для зниження операційних витрат і зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Запропоновані моделі також можуть сприяти адаптації до нових екологічних викликів, стимулюючи впровадження новітніх технологій у судноплавну галузь. Наведено рекомендації щодо проведення подальших досліджень у сфері управління паливними ресурсами суден та контролю за викидами в морській галузі, а також розробки інноваційних підходів до оптимізації маршрутів суден з урахуванням зовнішніх факторів.

**Ключові слова:** судноплавство, викиди  $CO_2$ , оксиди азоту ( $NOx$ ), оксиди сірки ( $SOx$ ), оптимізація маршрутів, споживання палива, екологічна ефективність, енергетична ефективність, метеорологічні умови, MARPOL, морські перевезення.

**Постановка проблеми.** Судноплавство є однією з найбільш енергоємних транспортних галузей і значним джерелом парникових газів та інших шкідливих викидів, включаючи  $CO_2$ ,  $NOx$  і  $SOx$ . Зростаючі вимоги до екологічної ефективності суден, впровадження міжнародних норм і стандартів, таких як Додаток VI до МАРПОЛ, і зон екологічного контролю (ЕСА), збільшують

потребу судноплавних компаній адаптуватися до нових викликів. З одного боку, це створює серйозні економічні труднощі для галузі через необхідність модернізації суден і впровадження нових технологій для скорочення викидів. З іншого боку, це відкриває нові можливості для впровадження інноваційних підходів до управління споживанням палива та маршрутами суден. При цьому

судноплавні компанії стикаються із завданням не тільки оптимізації викидів, а й мінімізації споживання палива, що безпосередньо впливає на їх операційні витрати.

Традиційні методи управління паливоспоживанням часто не враховують умов експлуатації, що змінюються, такі як погодні фактори і маршрути суден, що призводить до неоптимальних рішень. Таким чином, існує необхідність у розробці комплексних моделей, які можуть враховувати різні фактори, що впливають на викиди та витрату палива. В рамках цього дослідження ставиться завдання створення покращеної моделі для прогнозування викидів CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та SO<sub>x</sub> на основі даних про маршрути суден, їх швидкості, паливоспоживання та метеорологічні умови. Це дозволить не лише знизити вуглецевий слід від суден, а й підвищити їхню загальну енергетичну ефективність, що особливо важливо в контексті сучасних екологічних викликів та економічних обмежень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В умовах жорстких екологічних норм і зростаючої необхідності зниження впливу на навколишнє середовище, завдання оптимізації викидів і паливоспоживання суден стає все більш актуальною. У цій статті розглядаються методи оцінки викидів та моделювання їх взаємозв'язку з параметрами експлуатації судна, включаючи швидкість, маршрут та погодні умови.

**Постановка завдання.** Основна мета цього дослідження – запропонувати підходи для мінімізації викидів та підвищення паливної ефективності за допомогою аналізу розширених даних, таких як витрата палива, метеорологічні дані та енергетична ефективність судна на різних етапах маршруту. Очікується, що отримані результати допоможуть у розробці ефективніших алгоритмів оптимізації маршрутів, а також у створенні рекомендацій для судноплавних компаній щодо скорочення негативного впливу на довкілля.

Безліч досліджень присвячено аналізу викидів та паливоспоживання суден з метою зниження їх екологічного впливу. Так в Скоко (Skoko) та ін. (2024) провели порівняльний аналіз викидів CO<sub>2</sub>, паливоспоживання та витрат на паливо для дизельних та гібридних двигунів суден, виявивши, що гібридні системи можуть суттєво знизити викиди за певних умов експлуатації [1]. Радван (Ridwan) та ін. (2023) порівняли викиди вуглецю від дизельних та «зелених» суден з оптимізацією маршрутів, що дозволяє зменшити вуглецевий слід судноплавства [2]. Чен (Chen) та ін. (2023) розглянули маршру-

тизацію суден в Арктиці з точки зору витрат на паливо та викидів вуглецю, показавши необхідність урахування специфіки регіону для ефективного планування [3]. У роботі Ендресен (Endresen) та ін. (2007) представили історичну реконструкцію витрати палива та викидів суден, надаючи важливі дані для оцінки динаміки викидів [4]. Дундулакис і Папаефтіміу (Doundoulakis & Papaefthimiou) (2022) у своєму дослідженні показали необхідність поліпшення методів оцінки викидів на основі активності суден та даних про споживання палива для скорочення викидів у короткострокових морських перевезеннях [6].

Ці дослідження демонструють важливість як технічних, так і оперативних заходів для оптимізації споживання палива та зниження викидів у судноплавстві. Розробка ефективних алгоритмів маршрутизації та управління споживанням палива залишаються ключовими факторами для підвищення екологічної та енергетичної ефективності суден.

**Виклад основного матеріалу.** Для забезпечення більш точного моделювання викидів і оптимізації паливоспоживання в рамках цього дослідження було використано широкий набір даних. Ці дані включають інформацію про тип судна, його швидкість, пройдену дистанцію, метеорологічні умови та витрати пального на різних етапах маршруту. Особлива увага була приділена залежності викидів від швидкості судна та зовнішніх факторів, таких як вітер і висота хвиль, що впливають на роботу двигунів.

Для кожного маршруту були розраховані викиди CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та SO<sub>x</sub> на одиницю пройдені дистанції, а також витрати пального на морську милю (т/НМ). Результати моделювання дозволили виявити критичні точки, у яких спостерігається різке збільшення викидів при зростанні швидкості судна або погіршенні погодних умов.

Моделювання проводилося з урахуванням не тільки типу пального, але й рівня його споживання на різних швидкостях. Основна мета полягала в тому, щоб знайти оптимальні параметри, за яких судно може підтримувати ефективну роботу двигунів з мінімальними витратами пального і викидами шкідливих речовин. Це дозволило створити алгоритм, який може бути використаний для прогнозування викидів і оптимізації маршрутів суден у реальних умовах експлуатації.

Для дослідження використовувався розширений набір даних, що дозволило більш точно моделювати викиди та споживання палива суден з урахуванням реальних експлуатаційних параметрів.

Основні показники включають дані про викиди CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та SO<sub>x</sub> на різних ділянках маршрутів суден, споживання палива в тоннах на морську милю, а також метеорологічні умови, що впливають на ефективність роботи суден. Дані було зібрано з різних типів суден.

В даному випадку використання часових кроків виправдано необхідністю моделювання процесів у дискретизованому часі для забезпечення більш точного й адекватного опису динаміки викидів шкідливих речовин та споживання палива судном. Тому в умовах мінливих зовнішніх факторів, таких як погодні умови (швидкість вітру, висота хвиль) і зміна експлуатаційних параметрів судна (швидкість, навантаження на двигун), часовий крок дозволяє провести дискретний аналіз у межах певних проміжків часу, що дає змогу відстежувати миттєві коливання викидів і витрат палива та враховувати їх вплив на загальну екологічну ефективність.

Для коректного представлення розрахунку викидів CO<sub>2</sub> пропонується урахуванням додаткових факторів, таких як погодні умови або швидкість судна.

– з урахуванням погодних умов:

$$E_{CO_2} = F \times D \times EF_{CO_2} \times W_c \quad (1)$$

де:  $E_{CO_2}$  – загальні викиди CO<sub>2</sub> (тонни),  $F$  – витрата палива (тонн на морську милю),  $D$  – пройдена дистанція (морські милі),  $EF_{CO_2}$  – коефіцієнт викидів CO<sub>2</sub> для даного типу палива,  $W_c$  – коефіцієнт впливу погодних умов (залежить від вітру, хвиль і температури).

– з урахуванням швидкості судна:

$$E_{CO_2} = F \times D \times EF_{CO_2} \times V_c \quad (2)$$

де:  $V_c$  – коефіцієнт впливу швидкості судна (враховує ефективність роботи двигуна на різних швидкостях).

– з урахуванням комплексних параметрів (де враховується одночасно і погодні умови ( $W_c$ ) і швидкість судна ( $V_c$ ), що дозволяє більш точно моделювати викиди на різних етапах маршруту):

$$E_{CO_2} = F \times D \times EF_{CO_2} \times \left(1 + \frac{W_c}{V_c}\right) \quad (3)$$

Оптимізацію паливоспоживання проводили з урахуванням погодних умов та можливих затримок у маршруті. Основний метод полягав у підборі мінімальної швидкості судна, яка давала б змогу мінімізувати витрати пального, виходячи з прогнозів погоди. Було враховано такі фактори, як швидкість вітру та висота хвиль, що впливають на роботу суднових двигунів.

На основі цих даних було розраховано оптимальний режим роботи судна, який мінімізував витрату палива за погодних умов, що змінюються, і дозволяв судну рухатися з мінімальними витратами палива (в тоннах на морську милю).

Розрахунки були виконані на основі даних про паливоспоживання, викиди та метеорологічні умови для різних типів суден. Основна увага приділялася залежності між швидкістю судна, його витратою палива та викидами CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> та SO<sub>x</sub>. Обчислення показали, що зі збільшенням швидкості судна значно зростає витрата палива, що безумовно веде до збільшення викидів. Однак оптимізація маршрутів з урахуванням погодних умов дозволяє значно знизити загальні викиди та паливні витрати.

На графіку викидів вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) можна спостерігати зміну викидів залежно від часу та швидкості судна. Оскільки викиди CO<sub>2</sub> безпосередньо пов'язані з кількістю палива, що спалюється, вони зростають при збільшенні швидкості судна та погіршенні погодних умов. Оптимальна швидкість судна, за якої досягається мінімальна витрата палива та мінімальні викиди CO<sub>2</sub>, становить близько 6–7 вузлів, що підтверджується графіками нижче.

Таблиця 1

Набір даних для розрахунків

Часовий крок, год	Дистанція, NM	Викиди CO <sub>2</sub> , т/NM	Викиди NO <sub>x</sub> , т/NM	Викиди SO <sub>x</sub> , т/NM	Витрата палива, т/NM	Швидкість судна, NM/год	Вітер, м/с	Висота хвиль, м
1	27.0	0.012	0.0095	0.003	0.05	6.5	5	1.2
2	26.0	0.0118	0.0093	0.0028	0.048	6.3	4.5	1.5
3	28.0	0.0125	0.0100	0.0032	0.052	7.0	6	1.3

Таблиця 2

Набір даних для оптимізації споживання пального

Швидкість судна, NM/год	Вітер, м/с	Висота хвиль, м	Витрати палива, т/NM	Енергетична ефективність, %
6.0	3	1.1	0.045	85
7.0	4.5	1.4	0.050	82
8.0	6	0.018	0.060	78



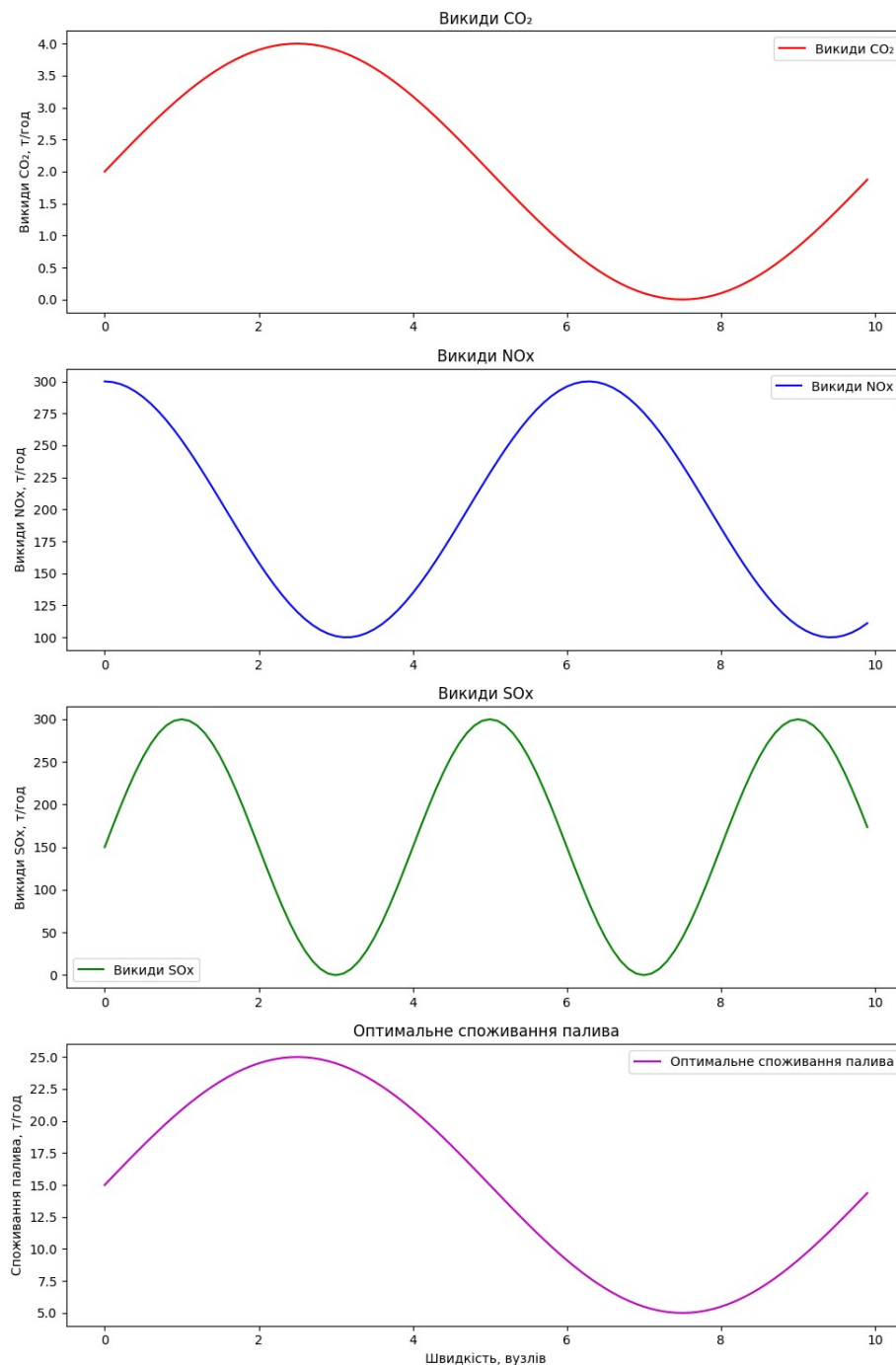


Рис. 1. Динаміка викидів та оптимального споживання палива

Таблиця 3

**Викиди CO<sub>2</sub>**

Крок, год	Дистанція, NM	Швидкість судна, NM/год	Викиди CO <sub>2</sub> , т/год
1	27	6.5	4.28
2	26	6.3	4.12
3	28	7.0	4.58

Аналіз даних показує, що з швидкостях вище 7 вузлів витрата палива різко зростає, що веде до

більшого вуглецевого сліду. Це пов'язано з тим, що судові двигуни стають менш ефективними за максимального навантаження, особливо в несприятливих погодних умовах, таких як сильний вітер та високі хвилі.

Викиди NO<sub>x</sub> безпосередньо пов'язані з високотемпературним спалюванням палива. Як і у випадку з CO<sub>2</sub>, викиди NO<sub>x</sub> зростають зі збільшенням швидкості судна та витрат палива. Піки викидів спостерігаються на ділянках марш-

руту з високою швидкістю та сильним вітром, коли судно змушене працювати на максимальній потужності для підтримки курсу.

Таблиця 4

**Викиди NOx**

Крок, год	Дистанція, NM	Швидкість судна, NM/год	Викиди NOx, т/год
1	27	6.5	0.26
2	26	6.3	0.24
3	28	7.0	0.30

Оптимізація маршрутів з урахуванням погодних умов дозволяє мінімізувати викиди NOx за рахунок вибору найефективнішої швидкості судна.

Викиди SOx, як і викиди NOx, залежать від типу палива та режиму роботи судових двигунів. Використання палива з низьким вмістом сірки суттєво знижує викиди SOx, що особливо важливо у зонах контролю викидів (ECA). Однак при використанні дешевого мазуту або палива з високим вмістом сірки викиди SOx збільшуються, що може спричинити екологічні порушення.

Таблиця 5

**Викиди SOx**

Крок, год	Дистанція, NM	Швидкість судна, NM/год	Викиди SOx, т/год
1	27	6.5	0.08
2	26	6.3	0.07
3	28	7.0	0.09

Оптимальні витрати палива досягаються при середній швидкості судна, що дозволяє двигуну працювати в найбільш ефективному діапазоні. При низьких та високих швидкостях витрата палива збільшується через неефективну роботу двигунів. Наприклад, при швидкості 6.5 вузлів витрата палива становить 6 т/NM, що є оптимальним значенням на даному маршруті переходу.

Таким чином, аналіз даних показав, що найбільш оптимальною швидкістю судна є 6–7 вузлів, при якій досягається мінімальна витрата палива та викиди CO<sub>2</sub>, NOx та SOx. Використання цієї швидкості у поєднанні з урахуванням погодних умов дозволяє судноплавним компаніям не лише знизити вуглецевий слід, а й скоротити операційні витрати на пальне.

З представлених даних видно, що оптимальна витрата палива також має хвилеподібний характер, відображаючи зміни у швидкості судна. На високих швидкостях витрата палива збільшується, що з неефективністю роботи двигуна на максимальних оборотах. Низькі значення витрати

палива досягаються під час руху судна на середній швидкості, що підтверджує оптимальний діапазон швидкості для мінімізації витрати палива.

**Результати.** За допомогою створеної моделі було проведено прогнозування викидів CO<sub>2</sub>, NOx і SOx на основі експлуатаційних даних, включаючи швидкість судна, витрати палива та погодні умови. Отримані результати показали, що при оптимізації швидкості та маршруту можна досягти значного зниження викидів у порівнянні з традиційними підходами.

Оптимальні параметри роботи судна включають підтримання швидкості в межах 6–7 вузлів, що дозволяє мінімізувати витрати пального та викиди парникових газів. При цьому спостерігається зниження викидів CO<sub>2</sub> на 15%, а NOx та SOx – на 10% при зміні швидкості на один вузол вниз у складних погодних умовах.

Метеорологічні умови, такі як швидкість вітру та висота хвиль, мають суттєвий вплив на ефективність суден. У дослідженні було виявлено, що несприятливі погодні умови можуть призвести до збільшення витрат палива на 20% і більше, особливо при швидкості судна понад 7 вузлів.

Розрахунки показали високу точність моделі, проте необхідно враховувати можливі похибки, пов'язані з точністю вимірювань погодних даних і витрат пального. Деякі показники могли змінюватися в залежності від умов, що не завжди були враховані під час моделювання.

Основним обмеженням є те, що модель не враховує вплив непередбачуваних технічних несправностей або людського фактору, що може призвести до відхилень у фактичних показниках. Крім того, для точного моделювання в реальних умовах потрібна більш детальна інтеграція з іншими навігаційними системами.

Запропонована модель може бути використана для дотримання екологічних норм у зонах контролю викидів (ECA). За допомогою оптимізації маршрутів суден можна забезпечити зменшення викидів SOx, що є важливим для відповідності міжнародним нормам, особливо в зонах із суворими екологічними вимогами.

**Висновки.** Проведене дослідження показало ефективність запропонованої моделі оптимізації маршрутів суден та мінімізації викидів. Отримані результати свідчать, що при правильному використанні алгоритмів можна досягти значного скорочення викидів і зменшення витрат пального. Запропоновані алгоритми можуть бути використані судноплавними компаніями для оптимізації маршрутів з урахуванням метеорологічних умов,

що не лише допоможе дотримуватися екологічних стандартів, але й скоротить операційні витрати на паливо. Майбутні дослідження повинні зосередитися на інтеграції реальних даних з суден в режимі

реального часу та розробці більш досконалих моделей для управління викидами. Це дозволить удосконалити процес моніторингу та управління екологічними аспектами роботи суден.

#### Список літератури:

1. Skoko I., Stanivuk T., Franic B., Bozic D. Comparative Analysis of CO<sub>2</sub> Emissions, Fuel Consumption, and Fuel Costs of Diesel and Hybrid Dredger Ship Engines. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024; 12: 999. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse12060999>.
2. Ridwan M., Low M. Y. H., Lin W. Comparison of Diesel and Green Ship Carbon Emissions with A-Star Route Optimization. In: *Proceedings of 2023 International Conference*. 2023. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-99-7240-1\\_14](https://doi.org/10.1007/978-981-99-7240-1_14).
3. Chen A., Chen W., Zheng J. Arctic Route Planning and Navigation Strategy: The Perspective of Ship Fuel Costs and Carbon Emissions. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023; 11: 1308. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse11071308>.
4. Endresen Ø., Sørgård E., Behrens H., Brett P., Isaksen I. A historical reconstruction of ships' fuel consumption and emissions. *Journal of Geophysical Research*. 2007; 112. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006JD007630>.
5. Vehicles, Phase, Systems, Board, Sciences, Division, Transportation, Board, Council, National. Reducing the fuel consumption and greenhouse gas emissions of medium- i heavy-duty vehicles, Phase Two: First report. 2014. DOI: <https://doi.org/10.17226/18736>.
6. Doundoulakis E., Papaefthimiou S. Comparative analysis of fuel consumption and CO<sub>2</sub> emission estimation based on ships activity and reported fuel consumption: the case of short sea shipping in Crete. *Greenhouse Gases: Science and Technology*. 2022; 12. DOI: <https://doi.org/10.1002/ghg.2174>.
7. Bagheri E., Masih-Tehrani M., Azadi M., Moosavian A., Sayegh S., Hakimollahi M. Розробка Impact of Date-specific Analytics on Vehicle Fuel Consumption and Emissions: A Case Study of Shiraz City. *Heliyon*. 2024; 10: e36713. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36713>.
8. Cepowski T., Drozd A. Measurement-based relationships between container ship operating parameters and fuel consumption. *Applied Energy*. 2023; 347: 121315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121315>.
9. Sui C., de Vos P., Stapersma D., Visser K., Ding Y. Fuel Consumption and Emissions of Ocean-Going Cargo Ship with Hybrid Propulsion and Different Fuels over Voyage. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020; 8: 588. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse8080588>.
10. Uyanık T., Kartal S., Arslanoğlu Y. Ship fuel consumption and emission amount modelling and minimization with fuzzy logic. *International Conference & Workshop REMOO-2017 ENERGY FOR TOMORROW 10–12 May 2017*, Venice, Italy.
11. Melnyk O., Onychchenko S. Ensuring Safety of Navigation in the Aspect of Reducing Environmental Impact. *ISEM 2021, LNNS 463*. C. 1–9. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8_9).
12. Onishchenko, O., Golikov, V., Melnyk, O., Onyshchenko, S., Obertiur, K. Technical and operational measures to reduce greenhouse gas emissions and improve the environmental and energy efficiency of ships. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022; 116: 223–235. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.116.14>.
13. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., Lohinov, O., Ocheretna, V., Dovidenko, Y. Basic aspects ensuring shipping safety. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2022; 117: 139–149. DOI: <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.117.10>.
14. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S., Golikov V., Sapiha V., Shcherbina O., Andrievska V. Study of Environmental Efficiency of Ship Operation в Terms of Freight Transportation Effectiveness Provision. *TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2022; 16(4): 723–722. DOI: <https://doi.org/10.12716/1001.16.04.14>.

#### **Loginov O.V., Melnyk O.M., Voloshyn A.O., Kucherenko V.Yu., Voloshin D.A., Varlan T.Ye. EMISSIONS ANALYSIS AND STRATEGIES FOR OPTIMIZING ENVIRONMENTAL ASPECTS OF SHIP OPERATIONS**

*One of the key tasks of the modern maritime industry is to comply with international environmental standards, in particular MARPOL Annex VI and the requirements of emission control areas (ECAs). The article discusses the environmental aspects of ship operation as a key element of the maritime transportation system. In particular, the impact of the ship's route and fuel consumption on the volume of emissions of harmful substances such as carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and sulfur oxides (SO<sub>x</sub>) is investigated. To solve this problem, the article develops a model for optimizing the ship's route, which takes into account not*

*only fuel consumption but also meteorological conditions, ship speed, and fuel consumption. The study is based on a comprehensive emissions analysis based on real ship operation data, which allows to assess the impact of speed, distance, and weather factors on CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and SO<sub>x</sub> emissions. The model minimizes emissions and achieves greater fuel efficiency by optimizing ship speeds within 6–7 knots, which significantly reduces fuel consumption and emissions. In addition, the study shows that weather conditions, such as wind and wave height, can affect the energy efficiency of ships, requiring additional route adjustments. The results obtained can be used in practice by shipping companies to reduce operating costs and reduce the negative impact on the environment. The proposed models can also facilitate adaptation to new environmental challenges by stimulating the introduction of the latest technologies in the shipping industry. The article provides recommendations for further research in the field of ship fuel management and emission control in the maritime industry, as well as the development of innovative approaches to optimizing ship routes with regard to external factors.*

**Key words:** *shipping, CO<sub>2</sub> emissions, nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>), sulfur oxides (SO<sub>x</sub>), route optimization, fuel consumption, environmental efficiency, energy efficiency, meteorological conditions, MARPOL, maritime transportation.*

УДК 656.6:616-036  
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/16>

**Решетков Д.М.**

Одеський національний морський університет

**Ларіна І.М.**

Одеський національний морський університет

## ВПЛИВ ПРОЦЕСІВ ЦИФРОВІЗАЦІЇ НА ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖІВ І ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ У МОРСЬКИХ ПОРТАХ

У статті надано короткий огляд досліджень щодо якості послуг морських портів. Встановлено, що їхні чинники не визначені однозначно. Вони повинні бути переглянуті з урахуванням проблем, що зараз впливають на морські порти, з особливим акцентом на цифровізації. Визначено, що цифрові технології впроваджуються в різних сегментах діяльності морських портів: інфраструктурі та надбудові, обробці вантажів, інтермодальних перевезеннях, митниці та зборах, безпеці, енергетиці та навколишньому середовищі. У свою чергу фактори якості морського порту можна визначити таким чином: надійність, гнучкість, безпека, цифрова інфраструктура та надбудова та цифрові навички. Надійність є фундаментальною, оскільки точна та своєчасна робота всіх, хто бере участь у наданні послуг, безпосередньо впливає на якість обслуговування морського порту. Гнучкість морського порту зосереджена на підході до користувачів, щоб надавати їм послуги відповідно до їхніх потреб та спрощувати процеси. Безпека передбачає безперешкодний процес надання послуг морського порту, вільний від будь-яких внутрішніх та зовнішніх загроз. Цифрова інфраструктура та надбудова усуває можливі вузькі місця у наданні послуг, оскільки операції із завантаження та розвантаження впливають на весь процес. Співробітники, які мають цифрові навички, є важливою частиною загальної якості послуг, оскільки вони безпосередньо залучені до процесу надання послуг морського порту. Кожен чинник якості послуг морського порту можна розглядати окремо, але їх синергія створює комплексне якість морського порту. Морські порти вже впроваджують цифрові технології, усвідомлюючи їхню важливість якості послуг та конкурентоспроможності серед інших морських портів. Очікується, що у майбутньому якість послуг морського порту більшою мірою визначатиметься цифровізацією. Морські порти України починають освоювати цифрові технології та технології автоматизації. Однак обмеження дорогої інфраструктури та високошвидкісного широкопasmового зв'язку поки що стримують цей процес. Отриманий у результаті аналізу теорії та практики впровадження цифрових технологій у морських портах світу перелік рушійних сил, проблем, переваг та недоліків сприяє розумінню основних аспектів, які необхідно враховувати у майбутніх проєктах розвитку портової галузі в Україні.

**Ключові слова:** послуги морських портів, фактори якості послуг, цифрові технології у морському порту.

**Постановка проблеми.** Послуги морського порту розвивалися разом із розвитком морських портів. Спочатку морські порти надавали прості вантажно-розвантажувальні послуги. В даний час морські порти виступають основною ланкою в міжнародному морському транспорті, пропонуючи різні послуги та залучаючи багато зацікавлених сторін.

Морські порти постійно зазнають впливу змін в економіці, транспорті, техніці тощо, які впливають на якість послуг морських портів. Процес цифровізації в портовому бізнесі також впливає та змінює якість обслуговування в морських портах.

Спочатку якість обслуговування в морських портах оцінювалася лише за рівнем виконання вантажно-розвантажувальних робіт. Поступово

така оцінка перетворилася на складну якість, що складається з різних факторів, які можуть включати: надійність, гнучкість, інноваційність, технологія, безпека тощо.

Цифровізація, тобто впровадження цифрових технологій, є одним із процесів, який сьогодні сильно впливає на морські порти та надання морських портових послуг. Провідні морські порти визнали важливість та потенціал цифрових технологій у забезпеченні якості послуг та конкурентоспроможності.

Розуміння основних аспектів цього процесу та впровадження передового світового досвіду буде сприяти розвитку морських портів України [1, 2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Огляд досліджень з послуг морських портів,

якості послуг морських портів дозволяє зробити такі короткі висновки.

Більшість авторів визначають транспортні послуги морського порту як усі види діяльності, пов'язані з перевантаженням вантажів, і навіть супутні послуги: пакування, етикетування, комп'ютерна підтримка, кодування тощо.

У ряді джерел [3–7] виділяються чотири групи послуг морського порту (рис. 1).

Згідно з дослідженням [3], в даний час морські порти знаходяться в п'ятому поколінні, орієнтованому на вимоги клієнтів. Таким чином, комунікаційні стратегії, що чітко формулюють пропозицію та цінність послуг морського порту, спрямовані на підвищення лояльності клієнтів та вимірювання задоволеності клієнтів, є вирішальними у конкурентній боротьбі.

Групи послуг морського порту			
Основні послуги	Додаткові послуги	Конкретні послуги	Логістичні послуги
включають перевалку, складування та транспортування в межах морського порту.	включають операції, пов'язані з вантажами (митний контроль, зважування тари, миття тари та ін).	залежать від типу вантажу і включають: температурний контроль, ветеринарний і фітосанітарний контроль, розміщення, розвантаження портативного генератора в контейнер і т.д.	включають страхування, дистрибуцію, експедирування, консалтинг, рекламу тощо.

Рис. 1. Групи послуг морського порту

В майбутньому морському порту шостого покоління, що включає технічні та організаційні інновації, рівень якості портового сервісу повинен відповідати соціальному та екологічному аспекту діяльності порту [4].

У деяких дослідженнях розглядається якість послуг морського порту як важливий чинник конкурентоспроможності морського порту. Крім того, робиться висновок, що конкурентоспроможність морських портів тісно пов'язана з роллю цифровізації у покращенні якості морських портів [5].

Морські порти, які бажають надавати якісні послуги та залишатися конкурентоспроможними, продуктивними, дружніми до клієнтів, повинні впроваджувати цифрові технології та приймати цифрове мислення [6].

**Постановка завдання.** Мета даного дослідження – визначення факторів якості обслуговування вантажів та транспортних засобів у морському порту на базі узагальнення світового досвіду впровадження цифрових технологій.

**Виклад основного матеріалу.** Очікується, що найближчими роками диджиталізація, тобто

впровадження цифрових технологій, змінить бізнес-моделі, процеси та діяльність у морській галузі, тобто морські порти та цифрові послуги будуть все більше впроваджуватися. Крім того, очікується, що якість послуг морського порту визначатиметься у майбутньому цифровізацією та стійкістю роботи морського порту.

Основними причинами через які морські порти впроваджують цифрові технології у наданні своїх послуг є: збільшення розмірів суден та обсягів вантажів у міжнародній торгівлі, необхідність адаптації послуг морських портів відповідно до їх конкретних комерційних та операційних потреб, необхідність максимізації віддачі інвестицій.

Крім того, цифрові технології впроваджуються в різні сегменти діяльності морських портів, які є частиною процесу надання послуг і включають різні зацікавлені сторони (табл. 1).

Морські порти можуть вибрати різні цифрові технології для впровадження у свої послуги, але вибір залежить від конкуренції, з якою стикаються морські порти, поточних результатів бізнесу, розміру морського порту, розташування морського порту, участі в торгівлі, стратегічних цілей морського порту і т.д.

Морські порти, переважно малі та середні, все ще не мають цифрових технологій у наданні послуг і, отже, менш конкурентоспроможні порівняно з морськими портами, які впровадили цифрові технології. Цифрові технології зараз використовуються у провідних морських портах світу, у яких якість послуг є пріоритетом, щоб залишатися конкурентоспроможними серед аналогічних морських портів.

В даний час найчастіше у провідних морських портах для надання послуг вантажам та транспортним засобам впроваджуються такі цифрові технології: 1) IoT (Інтернет речей); 2) Аналітика великих даних; 3) Хмарні обчислення; 4) Машинне навчання; 5) Цифрові близнюки; 6) Технологія блокчейн; 7) 3D-друк; 8) Штучний інтелект (AI); 9) Сенсорна технологія; 10) Доповнена реальність (AR).

Оскільки морські порти надають свої послуги у співпраці з багатьма заінтересованими сторонами, заінтересовані сторони також мають впроваджувати ці цифрові технології. Як зазначалося, морські порти можуть вибирати, які і скільки цифрових технологій вони використовуватимуть у наданні своїх послуг.

Цифрові технології також впливають на працівників морських портів, які є важливою частиною процесу обслуговування, оскільки безпосе-

## Основні причини впровадження цифрових технологій у наданні послуг морських портів

Напрямок впровадження		Очікуваний ефект
1	Інфраструктура та надбудова:	Цифрові технології дозволяють морським портам ефективно відстежувати, експлуатувати, контролювати та підтримувати фізичну інфраструктуру та надбудову.
2	Обробка вантажів:	Цифрові технології дозволяють морським портам надійно контролювати обладнання для обробки вантажів у морських портах і працювати з максимальною ефективністю, що зрештою підвищує продуктивність.
3	Інтермодальні перевезення:	Цифрові технології дозволяють координувати рух транспортних засобів для покращення транспортного потоку між морськими портами та пунктами призначення вантажів.
4	Митниця та збори:	Цифрові технології дозволяють морським портам покращувати інформацію про вантажі та документообіг, а також спрощувати процес оплати, оформлення торгових ліцензій, дозволів на імпорт та експорт та митне оформлення.
5	Безпека та захист:	Цифрові технології дозволяють морським портам контролювати всі фізичні елементи та контролювати пересування персоналу та користувачів у зоні морського порту (належна авторизація).
6	Енергія та навколишнє середовище:	Цифрові технології дозволяють морським портам знижувати споживання енергії та відходи.

редньо залучені до надання послуг. Цифровізація має на увазі наявність у працівників навичок використання цифрових технологій.

Очікується, що цифровізація змінить велику кількість існуючих робочих місць у секторі морських портів, які згодом замінять новими профілями. Морські порти, які бажають надавати якісні послуги та залишатися конкурентоспроможними, продуктивними, дружніми до клієнтів, повинні впроваджувати цифрові технології та приймати цифрове мислення.

Проведені дослідження якості обслуговування морських портів свідчать, що єдиного визначення якості послуг морських портів немає, оскільки різні автори виділяють різні чинники якості послуг морських портів.

Якість морських портових послуг змінювалася разом із розвитком морських портів та змінами переліку та видів портових послуг. Спочатку морські порти надавали лише вантажно-розвантажувальні послуги. Подальший розвиток морських портів призвело до розширення спектра послуг, включаючи промислові та комерційні.

На наступному етапі еволюції морські порти стали ланками міжнародної системи виробництва та розподілу. При цьому сталося об'єднання морських портів у мережу і вони надавали послуги «від дверей до дверей».

Починаючи з етапу створення мережі, морські порти модернізували свої послуги до рівня, зосередженого на вимогах клієнтів, вимогах зацікавлених сторін і технології як життєво важливих факторів у наданні якісних портових послуг.

Кожна з фаз вплинула визначення якості обслуговування клієнтури в морських портах.

Крім того, якість послуг морського порту можна спостерігати за різними аспектами: операції морського порту, користувачі морського порту та зацікавлені сторони морського порту, а також ширші аспекти, такі як навколишнє середовище та суспільство тощо.

Тенденції у транспорті та логістиці, наприклад, цифровізація та сталість вимагають від морського портового бізнесу адаптації, отже, передбачають зміни у визначенні факторів якості портових послуг. Поки що послуги морських портів адаптуються з допомогою застосування цифрових технологій.

Згідно з науковими дослідженнями, фактори якості послуг морських портів визначені таким чином (табл. 2).

Стійку роботу морського порту можна визначити як оптимальне використання ресурсів морського порту, мінімізацію забруднюючих речовин, мінімізацію викидів газів та відповідність потребам та очікуванням суспільства, що оточує морські порти.

Якість послуг підвищує репутацію морського порту та зміцнює його конкурентоспроможність.

Впровадження цифрових технологій у морських портах забезпечує надійність морських портових послуг.

Обмін інформацією та спрощена комунікація з клієнтами та зацікавленими сторонами, залученими до надання послуг морського порту, є основою надійних послуг морського порту.

**Висновки.** Модернізація та адаптація послуг морського порту відповідно до процесу цифровізації стає важливим процесом для того, щоб морські порти залишалися продуктивними, зручними,

## Фактори якості послуг морських портів

Фактори якості послуг	Вимоги до впровадження
<b><u>Надійність</u></b> Надання точного та повного обсягу портових послуг відповідно до всіх договірних умов	Надійність як фактор якості портових послуг значною мірою залежить від усіх зацікавлених сторін, залучених до послуг морського порту (наприклад, експедиторів тощо).
<b><u>Гнучкість</u></b> Адаптація послуг портів до вимог користувачів.	Морські порти повинні бути гнучкими, щоб постійно адаптувати свої послуги, а також, у разі особливих вимог, користувачів (наприклад, у разі непередбачених ситуацій).
<b><u>Безпека</u></b> Зниження ризиків при перевантажувальних роботах; відстеження вантажу в районі морського порту та за його межами; нагляд за територією морського порту.	Безпека забезпечує без перешкод процес надання послуг морського порту з погляду усунення потенційних внутрішніх (непередбачених ситуацій, таких як пожежа, травмування працівників тощо) або зовнішніх загроз (несанкціонований вхід до морського порту, підбір/залишення неправильних контейнерів тощо).
<b><u>Цифрова інфраструктура</u></b> Виконання операції із завантаження та розвантаження як основної частини процесу обслуговування має бути швидким та безперешкодним	Інфраструктура та надбудова морського порту повинні бути оснащені цифровими технологіями для швидкого реагування та кращого планування операцій (наприклад, датчики на кранах, які контролюють стан та умови роботи та збирають дані в режимі реального часу).
<b><u>Цифрові навички</u></b> Вміння використовувати різноманітні цифрові технології та прийняти цифрове мислення.	Працівники морського порту, а також усі працівники зацікавлених сторін, залучені до надання послуг морських портів, повинні мати цифрові навички.

ефективними та конкурентоспроможними. Цифрові технології впроваджуються в різних сегментах діяльності морських портів: інфраструктурі та надбудові, обробці вантажів, інтермодальних перевезеннях, митниці та зборах, безпеці та безпеці, енергетиці та навколишньому середовищі. Для морських портів доступні різні цифрові технології, і вибір залежить від мети кожного морського порту. Морські порти здебільшого поєднують кілька цифрових технологій, оскільки вони взаємопов'язані.

Чинники якості послуг морського порту не визначені однозначно. Таким чином, вони повинні бути переглянуті з урахуванням проблем, що зараз впливають на морські порти, з особливим акцентом на цифровізації.

Що стосується послуг морського порту, зацікавлених сторін морського порту та цифрових технологій, фактори якості морського порту можна визначити таким чином: надійність, гнучкість, безпека, цифрова інфраструктура та надбудова та цифрові навички. Надійність є фундаментальною, оскільки точна та своєчасна робота всіх, хто бере участь у наданні послуг, безпосередньо впливає на якість обслуговування морського порту. Гнучкість морського порту зосереджена на підході до користувачів, щоб надавати їм послуги відповідно до їхніх потреб та спрощувати процеси. Безпека передбачає безперешкодний процес надання послуг морського порту, вільний від будь-яких внутрішніх та зовнішніх загроз. Циф-

рова інфраструктура та надбудова усуває можливі вузькі місця у наданні послуг, оскільки операції із завантаження та розвантаження впливають на весь процес. Співробітники, які мають цифрові навички, є важливою частиною загальної якості послуг, оскільки вони безпосередньо залучені до процесу надання послуг морського порту.

Кожен чинник якості послуг морського порту можна розглядати окремо, але їх синергія створює комплексне якість морського порту.

Морські порти вже впроваджують цифрові технології, усвідомлюючи їхню важливість якості послуг та конкурентоспроможності серед інших морських портів. Хмарні платформи використовуються для підвищення надійності, оскільки це залежить від зацікавлених сторін (наприклад, логістичних операторів) та їх операцій, що робить послуги морських портів більш надійними. Штучний інтелект (AI) та доповнена реальність (AR) також використовуються у морських портах для підвищення якості обслуговування.

Морські порти не лише впроваджують цифрові технології, але й усвідомлюють важливість навчання працівників використанню цифрових технологій для досягнення необхідної якості обслуговування клієнтури у морських портах. Очікується, що у майбутньому якість послуг морського порту більшою мірою визначатиметься цифровізацією.

Морські порти України починають освоювати цифрові технології та технології автоматизації.



Однак обмеження дорожньої інфраструктури та високошвидкісного ширококутного зв'язку поки що стримують цей процес. Україні необхідно заздалегідь розробити дорожню карту або генеральний план та забезпечити необхідний бюджет та ресурси для створення розумних портів на державному рівні. Перехід до «розумних» портів з метою впровадження інновацій за допомогою автоматизації та

інтелектуальних систем портових операцій є особливо доцільним для України, яка прагне підвищити продуктивність та конкурентоспроможність на міжнародному рівні. Визначення таких пріоритетів та робота щодо їх реалізації саме зараз дуже важлива, оскільки Україна, як і ЄС, проходить етап значних змін, але пріоритети довгострокових проєктів мають сприяти розвитку морських портів.

#### Список літератури:

1. Решетков Д. М., Ромаха В. Л., Іванова І. М. Світовий досвід використання цифрових технологій у морських портах. Транспортні системи і технології: проблеми функціонування та розвитку портів. Том 6 : монографія / за ред. О.В. Кириллової. Одеса : Купрієнко СВ, 2021. С. 24–38.
2. Решетков Д.М., Бондарюк М.А., Онищенко С.П. Сутність, переваги та існуючий досвід розвитку розумних портів. Стаття. Розвиток транспорту. № 4 (15), ОНМУ, 2022. Фах.вид. (категорія «Б»), стор. 108–122. <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.09>
3. Improving the seaport service quality by implementing digital technologies Adrijana Agatić, Ines Kolanović University of Rijeka, Croatia, 2020; [https://www.researchgate.net/publication/342568466\\_Improving\\_the\\_seaport\\_service\\_quality\\_by\\_implementing\\_digital\\_technologies](https://www.researchgate.net/publication/342568466_Improving_the_seaport_service_quality_by_implementing_digital_technologies).
4. Berns, S., et al., (2017), Smart Ports; Point of view, Deloitte Port Services, Available. at: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/nl/Documents/energy-resources/deloitte-nl-er-port-services-smart-ports.pdf> [Accessed: 6 November 2019].
5. Hirata, E. (2019), Service characteristics and customer satisfaction in the container liner shipping industry, The Asian Journal of Shipping and Logistics, vol. 35, no. 1, pp. 24–29, Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2019.03.004> [Accessed: 25 October 2019].
6. Hlali, A., Hammami, S. (2017), Seaport Concept and Services Characteristics: Theoretical Test, The Open Transportation Journal, 11 (1), pp. 120–129, DOI: 10.2174/1874447801711010120, Available at: [https://www.researchgate.net/publication/322312263\\_Seaport\\_Concept\\_and\\_Services\\_Characteristics\\_Theoretical\\_Test](https://www.researchgate.net/publication/322312263_Seaport_Concept_and_Services_Characteristics_Theoretical_Test) [Accessed: 25 October 2019].
7. Deloitte, Smart Ports Point of View By Deloitte Port Services, 2017. URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/nl/Documents/energy-resources/deloitte-nl-er-port-services-smart-ports.pdf>

#### **Reshetkov D.M., Larina I.M. IMPACT OF DIGITALIZATION PROCESSES ON IMPROVING THE QUALITY OF CARGO AND VEHICLE SERVICE IN SEA PORTS**

*The article provides a brief overview of research on the quality of seaport services. It was established that their factors are not clearly defined. They should be reviewed in light of the challenges currently affecting seaports, with a particular focus on digitalisation. It was determined that digital technologies are implemented in various segments of seaport operations: infrastructure and superstructure, cargo handling, intermodal transportation, customs and duties, security, energy and environment. In turn, seaport quality factors can be defined as follows: reliability, flexibility, security, digital infrastructure and superstructure, and digital skills. Reliability is fundamental because the accurate and timely performance of all involved in service delivery directly affects the quality of service at a seaport. The flexibility of the seaport is focused on approaching users to provide them with services according to their needs and to simplify processes. Security involves a smooth process of providing seaport services, free from any internal and external threats. The digital infrastructure and superstructure eliminates potential bottlenecks in service delivery, as loading and unloading operations affect the entire process. Employees who have digital skills are an important part of the overall service quality as they are directly involved in the seaport service delivery process. Each factor of seaport service quality can be considered separately, but their synergy creates a comprehensive seaport quality. Seaports are already adopting digital technologies, recognizing their importance for service quality and competitiveness among other seaports. It is expected that in the future, the quality of seaport services will be largely determined by digitalization. Seaports of Ukraine are beginning to master digital and automation technologies. However, the limitations of expensive infrastructure and high-speed broadband are holding this process back so far. The list of driving forces, problems, advantages and disadvantages obtained as a result of the analysis of the theory and practice of the implementation of digital technologies in seaports of the world contributes to the understanding of the main aspects that must be taken into account in the future projects of the development of the port industry in Ukraine.*

**Key words:** seaport services, service quality factors, digital technologies in the seaport.

**Сільванська Г.М.**

Національний університет «Одеська морська академія»

**Шибасв О.Г.**

Національний університет «Одеська морська академія»

**Петриченко Є.А.**

Національний університет «Одеська морська академія»

**Карп Г.В.**

Національний університет «Одеська морська академія»

## ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СУЧАСНОГО РИНКУ КРУЇЗНОГО ТА ЛІНЕЙНОГО СУДНОПЛАВСТВА

У статті розглядаються закономірності розвитку круїзного судноплавства, проведено аналіз сучасного стану круїзних маршрутів пасажирських перевезень на 2023–2024 р. Міжнародна асоціація круїзних ліній (CLIA) опублікувала звіт про стан круїзної індустрії за 2024 р., де анасована кількість пасажирів за 2023 р. 31,7 мільйон пасажирів, цей показник порівняно з 2019 р. зріс на 7%. Звіт також показує що, постійний попит на круїзну подорож, становить 82%. Прогноз показника потужності круїзів показує збільшення за період – 10% (звітні періоди 2024–2028 р.).

«Важливим моментом, який підкреслює наш більш конструктивний погляд на круїзну індустрію після пандемії, є збільшення частки ринку, завдяки збільшенню світового ринку відпусток на 1,9 трлн доларів США та прискорене залучення нових клієнтів у круїзи», – сказав Метт Босс (департамент Stores & Specialty Softlines у JP Morgan), Попит залишається високим, і в бізнесі немає жодного історично провідного показника, зокрема кривої бронювання та витрат на борту, що свідчить про будь-яке пом'якшення» [5]. Круїзні оператори переглядають свої пропозиції, щоб привернути увагу споживачів. «Ключові оператори інвестують у нове обладнання, зокрема мега-судна та приватні напрямки. Це привертає більше уваги до придбання нових круїзних суден, розвитку інших напрямків, таких як Азія, Європа, Австралія, Західне узбережжя Північної Америки, Південна Америка, Африка та трансатлантичні маршрути, також демонструють позитивну динаміку.

Розвиток потенціалу ринку круїзного судноплавства сприятиме залученню інвестицій у портову інфраструктуру, суднобудування, суміжні сектори економіки, приморські території. Вимагає пошуку ефективного механізму управління функціонуванням пасажирського флоту (круїзних послуг та лінійних послуг) Нові туристичні стратегії, максимізують соціально-економічні вигоди. Метою дослідження є аналіз сучасного стану світового ринку пасажирських перевезень та об'єднання методики оцінки факторів, що впливають на конкурентоспроможність круїзних компаній.

**Ключові слова:** сегмент ринку споживачів пасажирських послуг, секції світового ринку пасажирських перевезень, кон'юнктура ринку, круїз, тарифна ставка, багатофакторний аналіз.

**Постановка проблеми.** Проаналізовано сучасний стан круїзного судноплавства. Спроековано морська сучасна система управління інтерфейсом СППР.

Ця система є інтерактивним графічним інтерфейсом, який спрощує взаємодію між СППР та його користувачами. Вона відображає результати (вихідні дані) аналізу у різних формах, таких як текст, таблиця, діаграми чи графіка. СППР, що застосовуються у маркетингових дослідженнях, які допомагають судохідним менеджерам будувати карту оперування по регіонах ринку, визначити тарифну ставку судна, коефіцієнт комфортабельності, обсяги продажів у досліджуваних регіонах оперування, обирати порти заходу круїзного судна, канали просування, вплив реклами,

керувати асортиментом послуг. Цей модуль СППР можуть робити прогнози по продажам та рентабельності [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проводився аналіз сучасного стану світового круїзного ринку [1, 2]. Виявлені основні тенденції розвитку світових круїзних компаній.

Загалом висновки зводяться до необхідності розвитку круїзного судноплавства, модернізації інфраструктури морських портів. В той же час дослідження потенціалу регіональних ринків круїзних послуг є недостатніми та потребують подальшої розробки механізмів його експлуатації за допомогою виявлення факторів вплив та управ-

ління ними. Сучасний розвиток ринку морських круїзних послуг полягає у поєднанні в ньому практично всіх форм пасажирського судноплавства та об'єднанні різних видів сервісу та організації дозвілля (готельне обслуговування, ресторанний бізнес, екскурсійна діяльність..

**Постановка завдання.** Аналізується та прогнозується стан ринку пасажирського судноплавства. Аналіз розподілу ринку поміж існуючими компаніями на базі даних CLIA.

Міжнародна асоціація круїзних ліній (CLIA) це провідний авторитет у світовій круїзній спільноті. Разом зі своїми членами та партнерами підтримує:

Відповідно з цією метою були поставлені та вирішені такі завдання:

- провести аналіз сучасного стану ринку морських круїзів;
- виявити основні тенденції розвитку світових круїзних компаній;
- визначити чинники, що впливають конкурентоспроможність компанії;
- оцінити рівень впливу цих чинників на величину тарифної ставки судна.

**Виклад основного матеріалу.** Проводиться аналіз сучасного стану світового круїзного ринку [1, 2, 5].

Виявлені основні тенденції розвитку та стану світових круїзних компаній. Проведений аналіз зроблено на базі СППР та її засобами Для проведення статистичного аналізу використовувалася програма SPSS (Statistics Powerful Statistical Software platform), версії 19 [3, 4, 5] виявив як модуль СППР, яка виявила:

– Кількість нових круїзних суден зросла на 27%, що на 12% більше, ніж за минулий рік.

– Круїзи є найкращим вибором для подорожей кількох поколінь: понад 30% сімей подорожують у круїзі принаймні двома поколіннями, а 28% круїзних мандрівників подорожують трьома-п'ятьма поколіннями.

– Експедиції та дослідження є секторами круїзного туризму, які найшвидше розвиваються. Експедиційними маршрутами становить 71% від загальної кількості круїзів за період від 2019 по 2023 р.

– Екскурсії для людей з обмеженими можливостями зростають: 45% круїзних пасажирів бронюють доступний тур для круїзу.

Проведено аналіз розподілу ринку у 2023 р. поміж регіонами на базі даних CLIA (рис. 1).

– Світовий ринок: у 2023 р загальна кількість круїзних пасажирів склала 31,7 мільйона, що на 6,8% більше порівняно з 2019 роком (29,7 мільйона).

Регіон	2023	2019	% зміни
Світовий	31.7 мільйона	29.7 мільйона	+6.8%
Північна Америка	18.1 мільйона	15.4 мільйона	+17.5%
Європа	8.2 мільйона	7.7 мільйона	+6.5%
Азія	2.3 мільйона	3.7 мільйона	-37.7%
Австралазія	1.34 мільйона	1.35 мільйона	-1.0%
Південна Америка	996 тис	935 тис	+6.6%

Рис. 1. Обсяг пасажирів у 2023 р.

– Північна Америка: значне зростання пасажиропотоку на 17,5% – з 15,4 мільйона в 2019 до 18,1 мільйона в 2023 р.

– Європа: легкий приріст на 6,5%, з 7,7 мільйона у 2019 до 8,2 мільйона у 2023 р.

– Азія: показала найбільше падіння на 37,7%, де кількість пасажирів скоротилася з 3,7 мільйона у 2019 до 2,3 мільйона у 2023 р.

– Австралія: знизилася на 1,0%, з 1,35 мільйона до 1,34 мільйона.

– Південна Америка: зростання на 6,6%, з 935 тисяч у 2019 до 996 тисяч у 2023 р.

Круїзна індустрія помітно прискорилося після серйозного удару під час пандемії COVID-19. За даними Міжнародної асоціації круїзних ліній (CLIA), у 2024 р очікується близько 35,7 мільйонів пасажирів, що на 6% більше, ніж у 2019 р.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дійсно, основні круїзні компанії провели успішний сезон 2024 р. Період із січня по березень, коли оператори пропонують свої найкращі пропозиції. «Ключові оператори інвестують у нові обладнання, зокрема у мега-судна та приватні напрямки. Це привертає більше уваги до галузі, прискорюючи придбання нових круїзних компаній» [1, 3, 2]. Важливим моментом, який підкреслює більш конструктивний погляд на круїзну індустрію після пандемії, є збільшення цієї частки ринку завдяки збільшенню «світовому об'єму відпусток», що становить 1,9 трлн. доларів США, та впровадження нових технологій що прискорюють залучення нових клієнтів у круїзи [1, 2].

Проведено аналіз та виявлені тенденції сучасної мети круїзних подорожей:

– 82% тих, хто вже здійснивав круїз, планують знову відправитися у подорож на круїзному лайнері.

– 71% міжнародних мандрівників розглядають можливість здійснити свій перший круїз.

– Намір здійснювати круїз залишається високим як серед тих, хто постійно подорожує, так і серед нових потенційних круїзерів.

– 12% круїзних мандрівників здійснюють круїз двічі на р.

– 10% круїзних мандрівників здійснюють від трьох до п'яти круїзів на (рис. 2).

Графік на (рис. 2) демонструє значне падіння кількості пасажирів круїзів у 2020 та 2021 роках, що, ймовірно, пов'язано з пандемією COVID-19 та обмеженнями на подорожі. Однак, починаючи з 2022 р., спостерігається стійке відновлення потужності, і прогнози на наступні роки вказують на продовження цього тренду.



Рис. 2. Прогноз кількості пасажирів круїзів

Тенденція відновлення спостерігається з 2022 р. (стійке зростання кількості пасажирів). Це свідчить про поступове відновлення попиту на круїзи. Прогноз на майбутнє (рис. 2): Тренд прогнозу на 2024–2027 роки вказує на продовження зростання кількості пасажирів. Очікується, що до 2027 р кількість пасажирів перевищить рівень 2019 р.

Графік (рис. 3) свідчить про те, що круїзна індустрія успішно відновлюється після пандемії COVID-19. Незважаючи на значні труднощі, сектор демонструє стійкість і потенціал для подальшого зростання.

Починаючи з 483,000 тис. місць у 2016 р, круїзна індустрія стабільно збільшує свою місткість: у 2023 р. цей показник зріс до 677,000 тис. місць (рис. 3).

– 2024 р: Прогнозується, що місткість зросте до 701,000 тис. місць.

– 2025 р: Очікується подальше збільшення пасажирообороту до 730,000 тис.

– 2028 р., пасажирообіг досягне 745,000 тис. місць, що означає 10% росту порівняно від рівня 2023 р.

Зростання круїзної індустрії виглядає безперервним, з помітним стрибком, у період з 2024 до 2028 р. Це зростання свідчить про високий попит на круїзи у майбутньому та бажання круїзних ліній задовольнити цей попит за допомогою введення нових кораблів або модернізації існуючих.

Круїзна індустрія продовжує розширюватися, навіть після пандемічних викликів, з прогнозованим зростанням на 10% у період з 2024 р. (рис. 2). Все це вказує на те, що індустрія залишається життєздатною, з перспективою на подальше відновлення та розвиток.

Майбутнє круїзної індустрії показано на (рис. 4, 5). Середній вік круїзера становить у середньому – 46 років. Майбутнє круїзної індустрії справді може бути за молодшими поколіннями, такими як міленіали. Міленіали (народжені приблизно між 1981 і 1996 роками) починають активно включатися у сегмент круїзних подорожей, надаючи їм нових значень та характеристик. За даними, вони становлять 22% від загальної кількості круїзних мандрівників. Ця група демонструє зростаючу зацікавленість у круїзах, орієнтуючись на такі фактори, як унікальні досвіди, екологічність та цифрові технології (рис. 5).

Середній вік круїзного туриста – 46 років, причому 36% з них є молодше 40 років. Це свідчить про значний інтерес серед молодшого покоління,



Рис. 3. Прогноз збільшення місткості круїзних суден (кількість спальних місць на круїзних лайнерах) з 2016 до 2028 р. [1, 3]



Рис. 4. Вік круїзного мандрівника

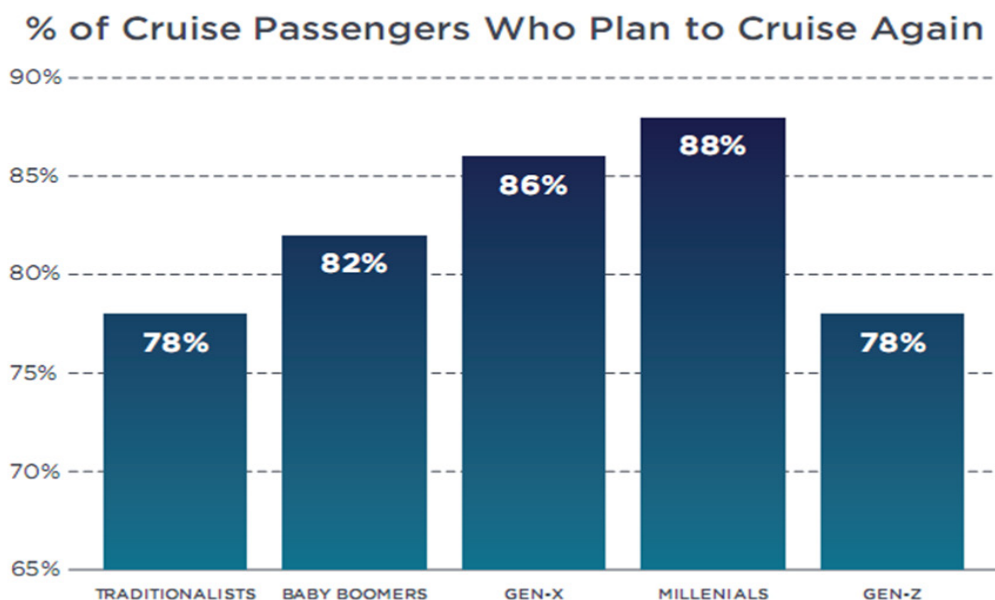


Рис. 5. Вік круїзного мандрівника

і цю тенденцію можуть підсилувати маркетингові стратегії, орієнтовані на їхні вподобання.

Загалом, діаграми (рис. 4, 5) вказує на те, що круїзні подорожі популярні серед усіх поколінь, але найбільша частка припадає на більш дорослі категорії: покоління X і бебі-бумерів.

Однак помітна значна присутність міленіалів (22%), що свідчить про зацікавленість молодших мандрівників у круїзах (рис. 6).

Популярність круїзних напрямків (рис. 6) наочно демонструє географічний розподіл пасажиропотоку в круїзній індустрії. Найбільш популярними напрямками для круїзів є Карибський басейн, Середземномор'я та Європа в цілому. Вод-

ночас, інші регіони, такі як Азія, Австралія та Південна Америка, хоча і мають меншу частку ринку, також є привабливими для круїзних туристів.

Карибські острови, Багамські острови та Бермудські острови є найпопулярнішим напрямком для круїзів, на який припадає 44,2% всіх пасажирів. Це пов'язано з теплим кліматом, красивими пляжами, різноманітністю розваг та відносно невисокою вартістю круїзів.

Середземномор'я та інші європейські напрямки також користуються великою популярністю серед круїзних туристів. Це пояснюється багатою історією та культурою регіону, різноманітністю портів заходження та можливістю поед-



Рис. 6. Популярність круїзних напрямків

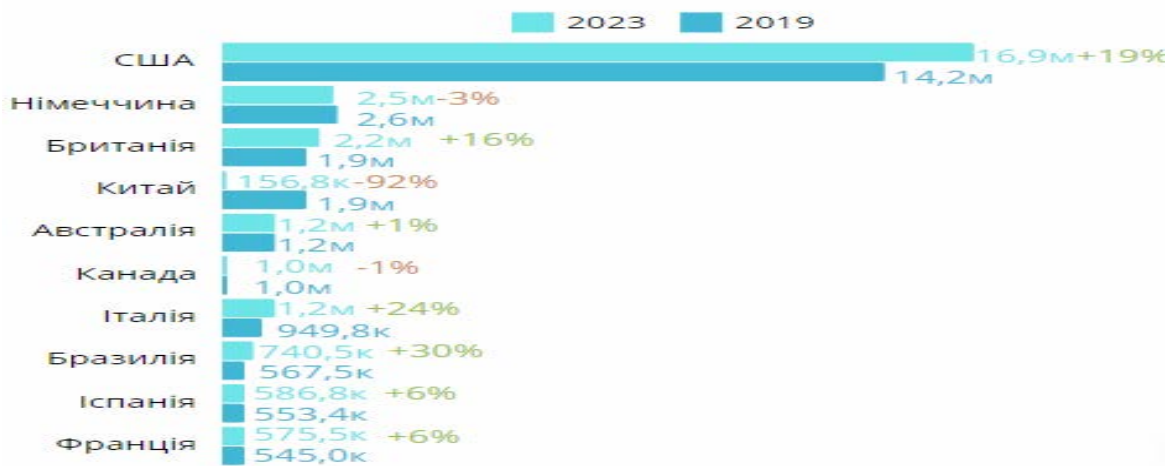


Рис. 7. Динаміка круїзного туризму за період з 2019 по 2023 роки

нати круїз з екскурсіями по європейських міста (28,9%).

Незважаючи на те, що Азія має меншу частку ринку, ніж Карибський басейн та Європа, спостерігається тенденція до зростання популярності круїзів в цьому регіоні. Це пов'язано з розвитком круїзної інфраструктури в Азії, зростанням середнього класу та інтересом туристів до екзотичних напрямків.

Хоча частка пасажирів, які обирають круїзи в Аляску, Канаду, Нову Англію, Африку, Австралію, Нову Зеландію, Південну Америку та інші регіони, є меншою, ці напрямки також мають своїх прихильників.

Круїзна індустрія є дуже динамічною, і популярність різних напрямків може змінюватися з часом. Однак, на сьогоднішній день Карибський басейн та Європа залишаються найбільш затребуваними регіонами для круїзних подорожей. З представлених на (рис. 6) даних, видно, що круїзна індустрія пережила значні зміни за період з 2019 по 2023 роки. Пандемія COVID-19 суттєво вплинула на цей сектор, викликавши різке падіння кількості пасажирів у 2020–2021 роках. Найбільше зростання кількості круїзних пасажирів спостерігається в США. Це свідчить про те, що американський ринок є одним з найбільш динамічних і відновлюється найшвидшими темпами.

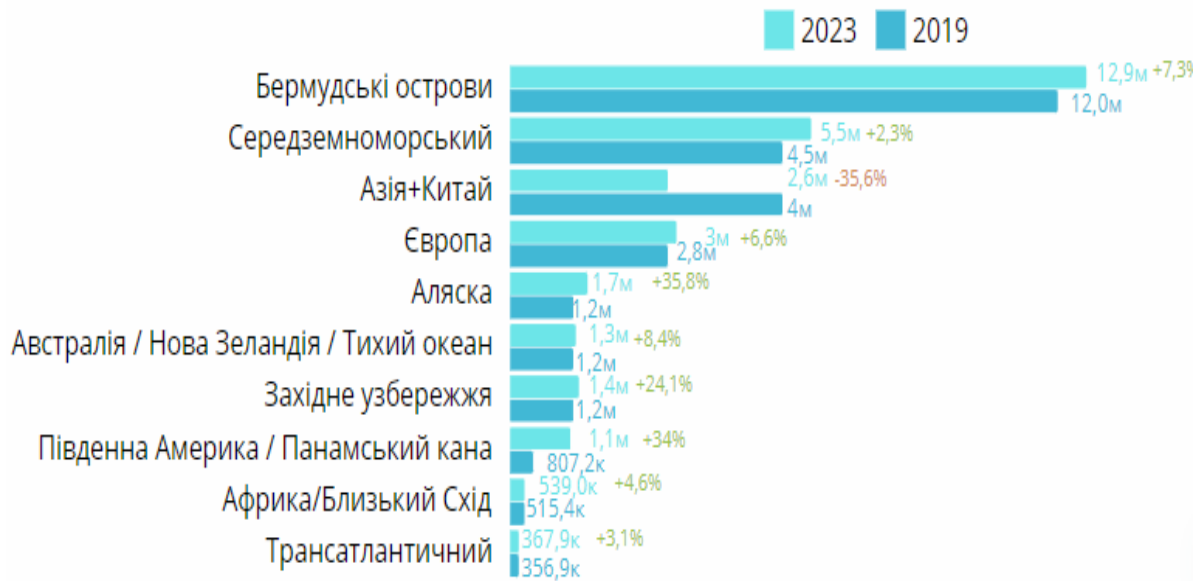


Рис. 8. Динаміка круїзного туризму за період з 2019 по 2023 роки

Більшість інших ринків, таких як Німеччина, Британія, Австралія, Канада, Італія, Бразилія, Іспанія та Франція, також демонструють позитивну динаміку. Незважаючи на значне зростання в 2023 р, китайський ринок ще не досяг рівня 2019 р. Це пов'язано з тривалими обмеженнями на подорожі в Китаї.

Бразилія та Італія демонструють найвищі темпи зростання, вони входять у топ-10 ринків. Середземномор'я демонструє значне зростання кількості мандрівників. З представлених даних (рис. 7) видно, що круїзна індустрія пережила значні зміни за період з 2019р. по 2023 р. Зміни пов'язані з багатством історичних та культурних пам'яток, різноманітністю портів заходження та привабливими кліматичними умовами.

Більшість інших напрямків, таких як Азія, Європа, Австралія, Західне узбережжя Північної Америки, Південна Америка, Африка та трансатлантичні маршрути, також демонструють позитивну динаміку.

**Формування цілей статті.** Нами була сформована база даних на основі статистики CLIA. Вона вмістила 400 суден з різних вище маніфестованих світових регіонів.

Усі висновки зроблено засобами програмного забезпечення IBM SPSS Statistics [4, 5]. Сформульовано основні напрямки еволюції круїзів, представлені тенденції по напрямкам.

Висновки стосовно розвитку круїзної індустрії.

Круїзи на сьогоднішній день становлять лише 2% від загального обсягу туристичного сектора. Але це:

– Сильна і стійка галузь: Стійке та постійне зростання протягом останніх 50 років, причому круїзний сектор виявляє більшу стійкість у періоди спаду, ніж інші сектори.

– Відповідальність і стійкість: Круїзи є одним із найбезпечніших способів подорожувати і стають одними з найбільш відповідальних та найкращих способів побачити світ, оскільки круїзні лінії просувають амбітну програму стійкого розвитку.

Порівняно з світовим торговельним морським флотом: вантажні судна, суховантажні судна та паромні переправи складають понад 68% світового торгового флоту. Це свідчить про те, що основним завданням флоту є перевезення вантажів, а не пасажирів. Круїзні лайнери, незважаючи на їхню популярність у туристичній індустрії, становлять менше 1% від загальної кількості суден. Це пов'язано з тим, що круїзна індустрія є лише одним з багатьох сегментів морського транспорту (рис. 9).

Круїзні тенденції нами аналізовані як наступні (рис. 10):

– 27% круїзерів за останні два роки є новачками у круїзах, що на 12% більше порівняно з попереднім дворічним періодом.

– 8–13% круїзних пасажирів подорожують самостійно.

– 13% круїзних пасажирів з канадських портів.

– 10% з портів США.

– 28% – круїзних мандрівників плывуть з трьох-п'яти поколінь.

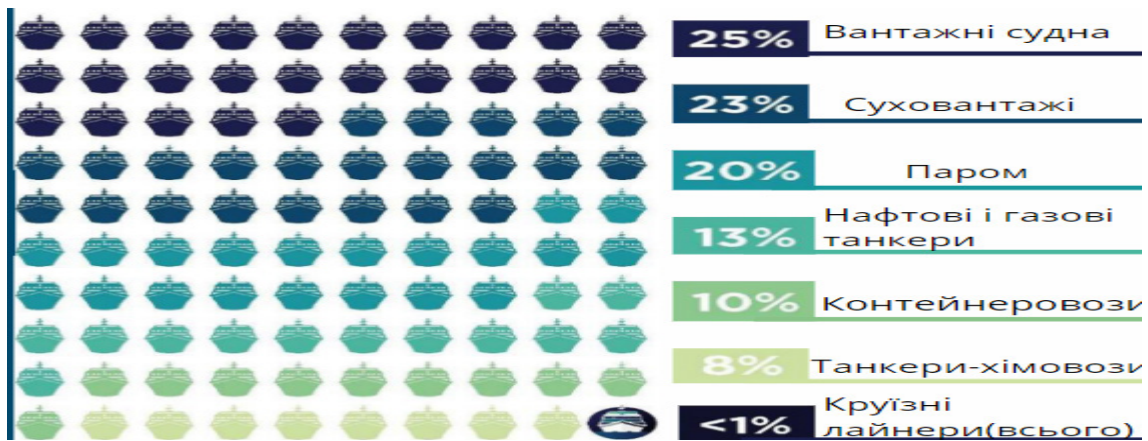


Рис. 9. Світовий торговий флот

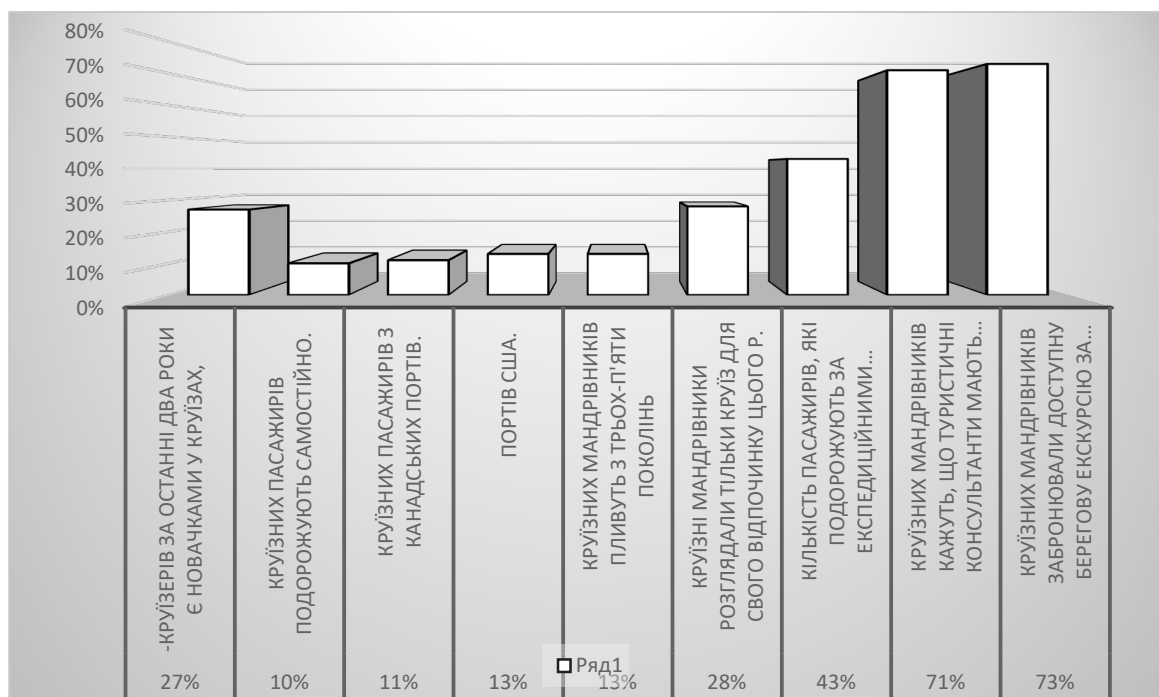


Рис. 10. Круїзні тенденції на 2023–2024 р.

- 11% – круїзні мандрівники розглядали тільки круїз для свого відпочинку цього р.
- 71% – кількість пасажирів, які подорожують за експедиційними маршрутами, зросла на 71% з 2019 по 2023 р.
- 73% – круїзних мандрівників кажуть, що туристичні консультанти мають значний вплив на їхнє рішення здійснити круїз.
- 43% – круїзних мандрівників забронювали доступну берегову екскурсію за минулий рік (рис. 10).

Напрямок «екологія» –являється провідним драйвером зростання. Круїзні лінії прагнуть досягти нульових викидів екологічних забруднень до 2050 р.:

- зменшення викидів під час стоянки в порту та в морі;
- прагнення до гнучкості у використанні палива, проведення численних випробувань;
- здійснення значних та конкретних інвестицій в екологічні технології та практики.

CLIA-члени круїзних ліній прямують до кращого майбутнього: зменшують викиди екологічних забруднень під час стоянки та в морі, інвестуючи в технології, інфраструктуру та операційну ефективність.

Протягом наступних п'яти років очікується значне збільшення кількості суден, які використовують альтернативні види палива або готові до переходу на паливо з нульовим викидом вуглецю.



Для досягнення мети використовуються різні технології, включаючи відновлюване біопаливо, зелений метан, зелений водень, акумуляторні батареї та паливні елементи.

Процес переходу на більш екологічні рішення буде поступовим. Наразі лише 4% суден використовують відновлюване біопаливо, але до 2028 р. планується запустити 15% суден з новими технологіями.

Індустрія орієнтована на майбутнє, інвестуючи в розробку та впровадження нових технологій, які дозволять зменшити викиди шкідливих речовин та зберегти навколишнє середовище.

Екологічні ініціативи в круїзній індустрії слідуючи:

- Круїзні компанії активно працюють над тим, щоб зробити свою діяльність більш екологічно чистою.

- Очищення стічних вод: Сучасні системи очистки дозволяють практично повністю очищати стічні води, перевищуючи за ефективністю багато наземних очисних споруд.

- Економія води: Розроблені системи, які дозволяють виробляти до 90% води на борту судна, що зменшує залежність від зовнішніх джерел.

- Утилізація відходів: Багато суден переробляють до 100% відходів, включаючи харчові та органічні.

- Захист морського середовища: Судна оснащуються системами, які зменшують шум і вібрацію, що дозволяє мінімізувати вплив на морську флору і фауну.

- Очищення вихлопних газів: Використовуються системи очищення вихлопних газів, які значно зменшують викиди шкідливих речовин.

- Берегове електроживлення: Все більше суден обладнується системами, які дозволяють підключатися до берегової електромережі в портах, що дозволяє вимкнути двигуни і зменшити викиди.

- Ефективні системи змащування і покриття корпусу: Ці системи зменшують опір води і підвищують паливну ефективність суден.

Мета цих заходів – зменшити негативний вплив круїзних суден на навколишнє середовище і досягти вуглецевої нейтральності до 2050 р.

Завдяки таким ініціативам круїзна індустрія стає більш екологічно свідомою і відповідальною. Це сприяє збереженню морського середовища і задоволенню потреб сучасних туристів, які все більше цінують екологічно чистий відпочинок.

**Методологія досліджування.** Для проведення статистичного аналізу використовувалася про-

грама SPSS(Statistics Powerful Statistical Software platform), версії 20 [5].

Розробка системи оцінки якісних показників методом ієрархічної агломерації за допомогою програми. Класифікація факторів впливу на пасажироробіт наведено у таблиці 1. Класифікація і розбиття об'єктів на однорідні групи є важливою процедурою в соціологічних дослідженнях. Виділити в досліджуваному масиві найбільш схожі між собою об'єкти і об'єднати їх в групи (кластери) дозволяє кластерний аналіз. Застосування цього методу в аналізі соціологічних даних стає все популярнішим, так як, по-перше, класифікація взагалі є фундаментальним науковим принципом, а по-друге, з розвитком і поширенням обчислювальних машин та відповідного програмного забезпечення виконання громіздких і важких у виконанні математичних розрахунків істотно полегшується. Суть кластерного методу полягає в тому, що об'єкти групуються в кластери виходячи з обчислених математично відстаней між ними. Спостереження, які мають між собою найменші відстані за певним набором ознак, потрапляють в один кластер. Дана програма використовується як модуль управління моделями у СППР [2, 3].

Створення СППР завжди включає в себе стадії аналізу даних та бізнес-процесів замовника, проектування структур сховища з урахуванням його потреб та технологічних процесів [7, 3, 5].

Організація БД, надає єдине середовище для зберігання корпоративних даних, у структурах, оптимізованих до виконання аналітичних операцій. Аналітичні засоби дозволяють кінцевому користувачеві, який не має спеціальних знань у галузі інформаційних технологій, здійснювати навігацію та подання даних у термінах предметної галузі.

Сховище даних (БД) [3, 4] є банком даних певної структури, що містить інформацію про виробничий процес судноплавної компанії. Головне призначення БД – забезпечувати швидке виконання сформованих аналітичних запитів. OLAP (On-Line Analytical Processing). Цей сервіс є інструментом для аналізу великих обсягів даних у режимі реального часу. Взаємодіючи з OLAP-системою, користувач зможе здійснювати гнучкий перегляд інформації, отримувати довільні сегменти даних та виконувати аналітичні операції деталізації, згортки, наскрізного розподілу, порівняння в часі. Вся робота з OLAP-системою відбувається у термінах предметної галузі.

Дає можливість:

- Розрахунок тарифної ставки.

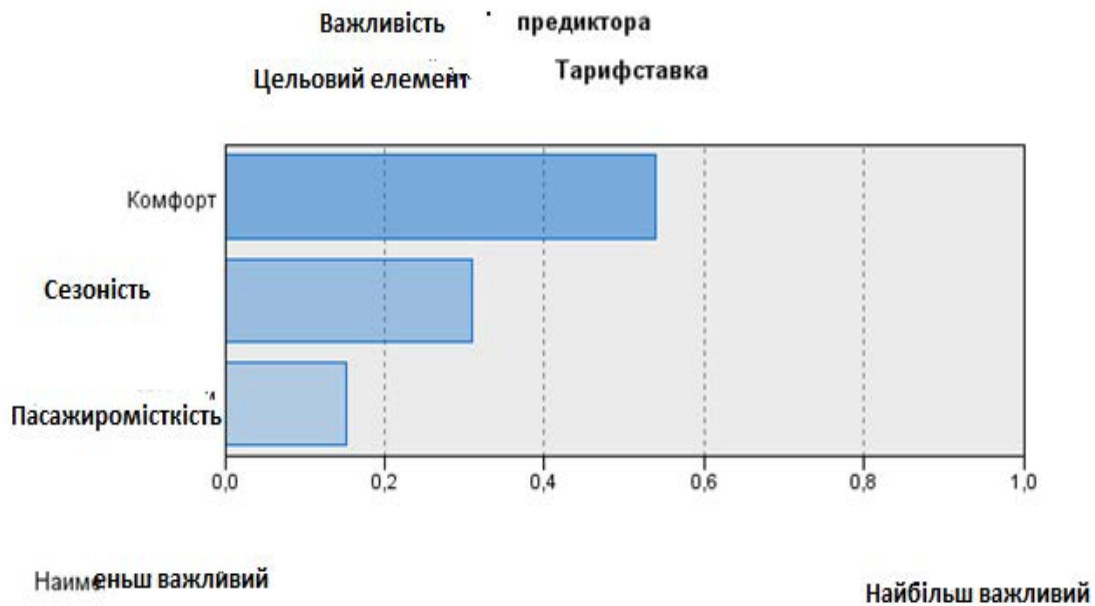


Рис. 11. Важливі цільові елементи впливу

- Розрахунок комфортабельності судна/тарифна ставка.
- Розрахунок показників роботи судна на маршруті.
- Проектування оптимального маршруту.
- Графіки заходів судна у запланований порт.
- Проектування оптимального завантаження судна для отримання прибутку.

1. База даних СППР [3, 4]:

База даних містить дані з різних джерел, включаючи внутрішні дані організації, дані, що генеруються різними додатками, а також зовнішні дані, отримані з Інтернету, і т. д. База даних систем підтримки прийняття рішень може бути невеликою або величезною (сховище даних), яке представляє собою банк даних, який підтримує інформаційні потреби організації.

2. База моделей СППР:

База моделей складається з різних математичних та аналітичних моделей, які використовуються для аналізу складних даних, тим самим виробляючи необхідну інформацію. Модель передбачає вихідні дані на основі різних вхідних даних або умов, або визначає комбінацію умов і вхідних даних, яка потрібна для отримання бажаного результату. Вибір моделей, які мають бути включені до системи підтримки прийняття рішень, залежить від вимог користувача та цілей СППР [5, 7, 8].

3. Система управління базою даних (СУБД):

Сукупність програмних засобів загального чи спеціального призначення, що забезпечують

управління виробництвом, маніпулюванням, та використанням баз даних (вставляти, видаляти, організувати та оновлювати). Система забезпечує безпеку зберігання даних, надійність та цілісність.

4. Система управління базою моделей (СУБМ):

Функціями цієї системи є класифікація, організація та доступ до форм, тобто ці функції аналогічні функції системи управління базами даних.

5. Система управління інтерфейсом:

Ця система є інтерактивним графічним інтерфейсом, який спрощує взаємодію між СППР та його користувачами. Вона відображає результати (вихідні дані) аналізу у різних формах, таких як текст, таблиця, діаграми чи графіка. Користувач може вибрати потрібний варіант (SPSS) для перегляду висновку відповідно до його вимог. Інтерфейс визначає: мова користувача; мову повідомлень комп'ютера, який організовує діалог на екрані дисплея; знання користувачеві [1, 6, 7].

Представлено важливіші цільові елементи (рис. 11) виділені програмою SPSS фактори, які мають найбільший вплив на прибуток компанії.

Метод ієрархічної кластеризації виділення факторів (класів), На рис. 12 наведено застосований метод Варда, який використовує алгоритм ієрархічної кластеризації виділення факторів за принципом масштабованої відстані (класів).

На рис. 12 представлений алгоритм об'єднання даних у кластери за допомогою програми SPSS, побудова дерева ієрархії з використанням методу

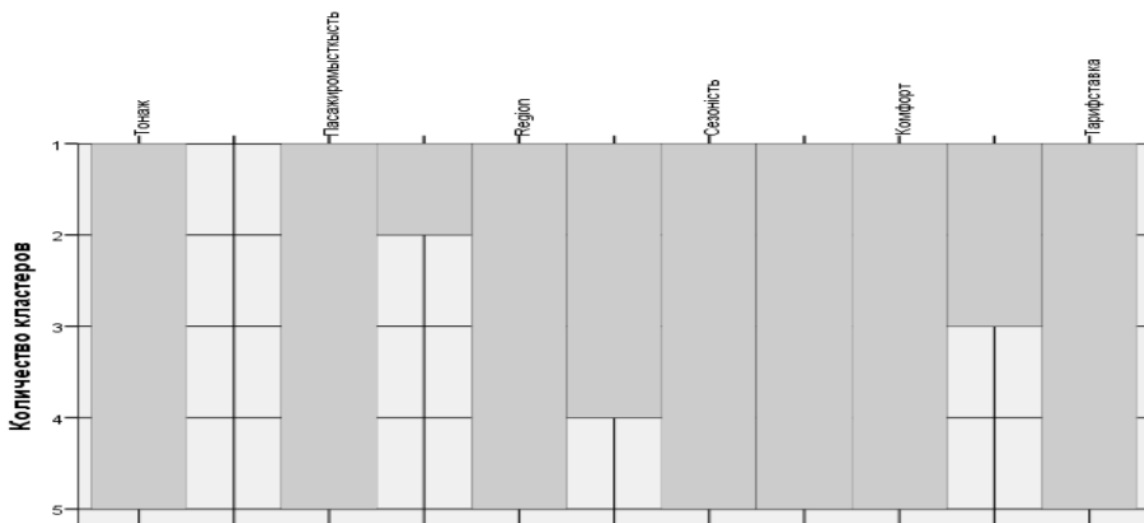


Рис. 12. Метод ієрархічної кластеризації виділення факторів (класів)

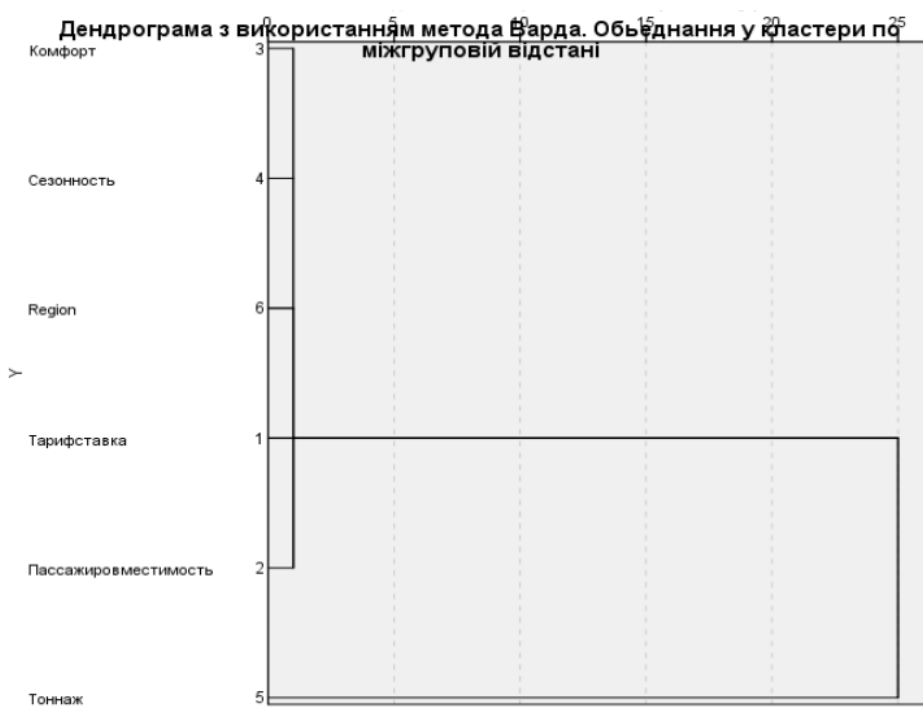


Рис. 13. Об'єднання в кластер відбуваються за значенням масштабованого показника – R-квадрат

Варда [15]. Об'єднання в кластер відбуваються за значенням масштабованого показника – R-квадрат.

Нами було виділено та представлено набір головних показників впливу на пасажирообіг – це Тарифна ставка, комфортабельність (коефіцієнт),

тонаж судна, регіон оперування, сезонність (рис. 14) [я трфакт]. Методом виділення у дисперсійному аналізі, який зветься метод головних компонент, були встановлено, що є найважливішим фактором впливу на величину пасажиробігу є показник комфорту (табл. 3) тобто, це тарифна

Таблиця 1

**Фактори впливу**

Спостереження	Вхідний матричний файл					
	Тарифна ставка	Пасажиромісткість	Комфорт	Сезонність	Тонаж	Region
Тарифнаставка	,000	4635631025,000	3965339,000	3986781,000	1739792464947,000	4016080,000
Пасажиромісткість	4635631025,000	,000	4676197984,000	4676805226,000	1689232025972,000	4676263115,000
Комфорт	3965339,000	4676197984,000	,000	144,000	1742070526622,000	181,000
Сезонність	3986781,000	4676805226,000	144,000	,000	1742086940708,000	189,000
Тонаж	1739792464947,000	1689232025972,000	1742070526622,000	1742086940708,000	,000	1742084683147,000

Таблиця 2

**Показники важливості та їх питома вага**

Nodes	Importance	Importance	V4	V5
Пасажиромісткість_transformed	0.1519	0,1519	Пасажиромісткість	0,1519
Сезонність_transformed	0.3098	0,3098	Сезонність	0,3098
Комфорт_transformed	<b>0.5383</b>	0,5383	Комфорт	0,5383

ставка, яка характеризує клас круїзу (53,8%). Дисперсію – 50,120% (табл. 5).

Комулятивність сама велика у другого фактора. Тобто його інформативність найбільша. Найбільш інформаційно впливовий показник.

Використовуючи дисперсію як змінну, що характеризує поведінку процесу, можна побудувати математичну модель, яка описує динаміку дисперсії. Така модель дає можливість прогнозувати значення дисперсії на задане число кроків і приймати рішення на основі цього прогнозу.

Дисперсію також використовують у системах статистичного аналізу якості продукції. невід’ємна складова сучасного виробництва, оскільки вона забезпечує неперервний контроль та підвищення якості послуг.

**Висновки.** У цій публікації була запропонована стратегія круїзного розвитку за допомогою чіткого визначення найвпливовіших факторів впливу на величину обсягу пасажирського потоку як основи цінової політики компанії. У цій статті зроблена спроба продемонструвати, як можна диференціювати фактори впливу на круїзні лінії та пасажирообіг судна, їх тарифну ставку, використовуючи дані зі збірки Варду та методу виділення: та аналізу головних компонент Кластерний аналіз використовується для визначення того, як ці судна відрізняються один від одного в маркетинговій стратегії по рівню конструктивної та сервісної комфортабельності. Показник комфортабельності є найбільш впливовим.

Таблиця 3

**База даних Належності до кластеру по**

Номер спостереження	Клас	Кластер	Відстань
1	Mainstream	1	224627,677
2	Mainstream	1	221760,764
3	Mainstream	1	80051,914
4	Mainstream	1	83955,518
5	Premium	1	225843,110
6	Premium	1	225827,323
7	Mainstream	1	181747,953
8	Mainstream	1	223108,076
9	Mainstream	1	89753,535
10	Mainstream	1	88821,181
11	Premium	2	,000
12	Premium	1	97564,704
13	Premium	1	222801,537
14	Premium	2	431002,754
15	Premium	2	438002,742
16	UltraPremium	1	37785,407
17	UltraPremium	1	75160,621
18	UltraPremium	1	38731,215
19	UltraPremium	1	38731,215
20	River	1	28730,248
21	River	1	44737,998
22	River	1	44738,572
23	UltraPremium	1	28537,603
24	UltraPremium	1	,000
25	LUXERY	1	6245,930
26	LUXERY	1	5539,382
27	LUXERY	1	28012,312
28	LUXERY	1	108007,856
29	UltraPremium	1	126001,242

Таблиця 4

## Матриця компонента

	Компонента		
	1	2	3
Тарифна ставка	,816	-,043	,104
Комфорт	,773	,054	,525
Сезонність	-,609	-,658	,425

Метод виділення: Аналіз методом головних компонент.  
Ізвлечених компонент: 3.

Таблиця 5

## Матриця преобразування компонента

Компонента	1	2	3
1	,743	-,484	-,462
2	,035	,718	-,695
3	,668	,501	,550

Метод виділення: Аналіз методом головних компонент.  
Метод обертання: Варимакс с нормалізацією Кайзера.

Таблиця 6

## Повна дисперсія

Компонента	Начальні приватні значення			Сумми квадратів навантаження ізвлечення			Сумми квадратів навантаження обертів		
	Итого	% Дисперсія	Кумулятивний %	Итого	% Дисперсія	Кумулятивний %	Итого	% Дисперсія	Кумулятивний %
1	2,005	50,120	50,120	2,005	50,120	50,120	1,382	34,544	34,544
2	,886	22,159	72,278	,886	22,159	72,278	1,080	26,993	61,537
3	,613	15,329	87,608	,613	15,329	87,608	1,043	26,071	87,608

Метод виділення: Аналіз головних компонент.

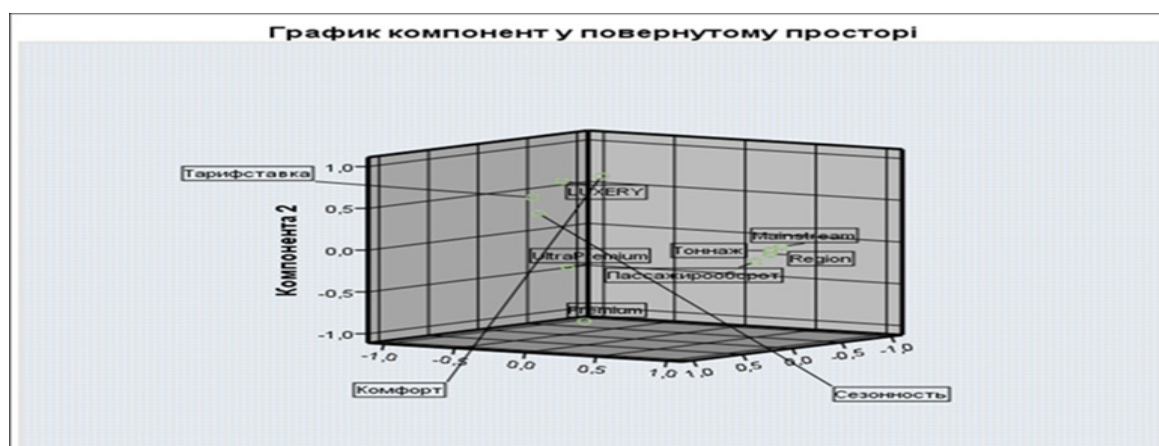


Рис. 14. Виділенні фактори впливу

Тенденції:

По-перше, в круїзному бізнесі домінують дві найбільші лінії (CarnivalCruiseLine, Royal Caribbean), які отримують близько 75% загальної частки ринку пасажирів.

По-друге, круїзні лінії пропонують круїзний досвід практично для кожного пасажирів:

- великі судна (Royal Caribbean, CarnivalCruiseLine);
- маленькі (Seabourn);
- дуже нові (Royal Caribbean);
- старі (MSC, CarnivalCruiseLine);
- високий рівень обслуговування та дуже високі оцінки обслуговування (Narag-Lloyd).

По-третє, сильна і стійка галузь: Стійке та постійне зростання протягом останніх 50 років, причому круїзний сектор виявляє більшу стійкість у періоди спаду, ніж інші сектори.

– Відповідальність і стійкість: Круїзи є одним із найбезпечніших способів подорожувати і стають одними з найбільш відповідальних та найкращих способів побачити світ, оскільки круїзні лінії просувають амбітну програму стійкого розвитку.

Круїзна індустрія в 2023 р. продовжує займати провідне місце в області стійкого морського туризму. Асоціація CLIA прогнозує подальше зростання глобальних круїзних пасажирів у наступні чотири роки, прогножуючи 35,7 мільйона у 2024 р., 37,1 мільйона у 2025 р., 38,9 мільйона у 2026 р. та 39,4 мільйона у 2027 р. Щоб пасажирські перевезення став прибутковим бізнесом, необхідно здійснювати його розвиток відповідно до нової парадигми конкурентоспроможності, яка ґрунтується на кластерному підході.

**Список літератури:**

1. Cruise Market Ward, D. The complete guide to cruising & cruise ships. Berlitz Publishing Company, London, UK.2023.
2. О. Г. Шибасєв, Г. М. Сільванська, С. В. Кручек. Методика виявлення факторів впливу на пасажирообіг при проектуванні круїзних ліній. Вісник Херсонського національного технічного університету. Засновник видання: Херсонський національний технічний університет. Серія «Транспортні системи та технології» Частина 1 Том № 1(88). 2024.Україна.друк\_01.05.2024. journals.kntu.
3. О.Г. Шибасєв, Г.М. Сільванська, Ю.В. Михайлова, Г. В. Карп, системи Підтримки прийняття рішень як ефективний інструмент реалізації управління роботою круїзного та лінійного судноплавства. Вісник Херсонського національного технічного університету Засновник видання: Херсонський національний технічний університет. Серія «Транспортні системи та технології» Частина 1 Том № 1. 2023. Україна друк\_30.05.2023.[https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/visnyk\\_kntu/](https://journals.kntu.kherson.ua/index.php/visnyk_kntu/)
4. Farakhutdinov, Sh. F., Bushuyev, A.S. Processing and Analysis of Sociological Research Data in the SPSS 17.0 Package. Course of lectures : tutorial / Sh. F. Farakhutdinov, A. S. Bushuyev. – Tyumen : TyumSOGU, -220 p.ISBN 978-5-9961-0414-7.2011.
5. <https://www.jpmorgan.com/insights/global-research/travel/cruise-outlook>
6. Pallis, A.A., Vaggelas G.K. The changing geography of cruise shipping. In: Wilmsmeier, G., Monios, J., Browne, M. Woxenius, J. (eds.)Geographies of waterborne transport: Transitions from transport to mobilities, 170-191. Cheltenham: Edward Elgar. 2023. Pp.170-191.
7. Michael, E. Porter, . Michael E. Porter on Competition . М.: Вільямс, 2020. С. 608 с.

**Silvanskaya G.N., Shibaev A.G., Petrichenko Ye.A., Karp G.V. MAIN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF THE CURRENT CRUISE AND LINER SHIPPING MARKET**

*The article examines the patterns of development of cruise shipping and analyzes the daily development of cruise routes for passenger transportation for 2023–2024. The Cruise Lines International Association (CLIA) published a report on the size of the cruise industry for 2024, and the number of passengers in 2023. 31.7 million passengers, this figure increased in 2019. increased by 7%. This also shows that regular drinking on a cruise is more expensive, reaching 82%. The forecast for cruise activity shows an increase of 10% over the period (seasonal periods 2024–2028). “An important point that reinforces our more constructive view of the cruise industry after the pandemic Yes, there is an increase in the share of the market, and therefore an increase in the light market by 1,9 trillion US dollars and will quickly gain new clients from the cruise,” said Matt Boss (Department of Stores & Specialty Soflines at JP Morgan), Popit will lose tall, and in business there is no desired historically proven display, looking at the crooked armor and vistras on board to indicate any deterioration” [1]. Cruise operators are reviewing their positions in order to gain respect for the ch\_v. “Key operators are investing in new ownership, close to mega-vessels and privately. This places greater emphasis on the arrival of new cruise ships, the development of other destinations such as Asia, Europe, Australia, the Western Coast of Western America, Western America, Africa and transatlantic routes, which also demonstrate positive dynamics iku Development of the potential of the cruise shipping market by obtaining investments in port infrastructure , shipbuilding, small sectors of the economy, coastal territories. The focus is on the search for an effective mechanism for managing the functioning of the passenger fleet (cruise services and line services) New tourism strategies to maximize socio-economic benefits. The research method is to analyze the current state of the light market for passenger transportation and develop a methodology for assessing factors that influence the competitiveness of cruise companies.*

**Key words:** *segment of the passenger services market, sections of the light passenger transport market, market conditions, cruise, tariff rate, multifactor analysis.*

**Трушевський В.Е.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗТАШУВАННЯ І ПІДКЛЮЧЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ СВІТЛОФОРІВ ПРИ РЕГУЛЮВАННІ ЗА ОКРЕМИМИ НАПРЯМКАМИ

У статті розглядаються існуючі функціональні електричні схеми, які застосовуються для здійснення автоматичного контролю справної роботи випромінювачів світлофорних сигналів транспортних світлофорів (світлодіодних матриць). В ході аналізу літературних джерел та практичного досвіду встановлено, що наразі найбільш розповсюдженими є електричні схеми з використанням зворотних дротів від світлодіодних матриць та із застосуванням датчиків, що вимірюють силу струму, яка проходить прямими дротами. Досліджено переваги та недоліки кожної з цих вимірних схем, які загалом полягають у зниженні чутливості схеми до коливань значень струму внаслідок його стікання на землю або через інший світлоблок, а також зниження надійності роботи світлофорного об'єкта та дорожнього контролера загалом через використання лише одного прямого дроту на всі червоні сигнали одного транспортного напрямку регулювання. Запропоновано застосовувати на практиці схему, що базується на контролі значень прямого струму за умови її вдосконалення для перехресть, де використовуються у транспортних світлофорах табло зворотного відліку залишкового часу червоного та зеленого сигналів. Удосконалення полягає у введенні до схеми додаткової лінії живлення для електричної схеми табло зворотного відліку часу та введенні гальванічної розв'язки між матрицями червоного сигналу та електричним контуром табло. Таке удосконалення дозволило унеможливити ситуацію, у якій брак струму у контрольованій лінії червоного сигналу під час виходу з ладу матриці компенсується струмом, що його використовує для своєї роботи табло зворотного відліку. Також проаналізовано вимоги нормативних документів до розміщення основних і дублюючих транспортних світлофорів другого типу на під'їздах до перехресть, де здійснюється регулювання руху транспорту за окремими напрямками, запропоновано загальні принципи щодо розміщення основних та дублюючих світлофорів другого типу з урахуванням вимог безпеки дорожнього руху та належного рівня інформаційного забезпечення водіїв.

**Ключові слова:** світлофор, смуга, сигнал, контроль, напрям регулювання, безпека дорожнього руху, дублювання, контролер, світлодіодна матриця, електричний струм.

**Постановка проблеми.** У зв'язку із розширенням функціональних можливостей дорожніх контролерів відбувається значне ускладнення схем пофазового роз'їзду на регульованих перехрестях через широке застосування технології окремого керування сигналами за напрямками світлофорного регулювання.

Застосування таких технологій в більшості випадків пов'язано із використанням транспортних світлофорів другого типу. Упровадження таких світлофорів збільшує інформаційне навантаження на водіїв та робить актуальними значну кількість нерозв'язаних питань науково-практичного плану, пов'язаних передусім із оптимальністю розташування транспортних світлофорів для забезпечення найкращого та однозначного сприйняття їх сигналів і забезпечення належного електричного контролю справності світлофорних сигналів з урахуванням їх дублювання за напрямками регулювання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

У статті [1, с. 107] автори зауважують, що забезпечення швидкого та безпечного руху транспортного потоку у сучасних містах потребує запровадження комплексу заходів архітектурно-планувального та організаційного характеру. Також вони зазначають, що при реалізації заходів з організації дорожнього руху в містах особлива роль належить використанню технічних засобів: дорожніх знаків і розмітки, світлофорних об'єктів, при цьому світлофорне регулювання вважається одним із основних засобів забезпечення безпеки руху на перехрестях.

Як йдеться у [2, с. 30], режими роботи світлофорних об'єктів на регульованих перехрестях українських міст визначаються сертифікованими проектними організаціями в галузі організації дорожнього руху, які керуються чинними в цій сфері нормативно-правовими актами, але ці доку-

менти визначають лише найбільш загальні вимоги до світлофорних об'єктів та надають досить велику свободу проєктувальникам у процесі формування циклів світлофорного регулювання.

У матеріалі [3, с. 751] зазначається, що збільшення кількості автомобілів на дорогах і збільшення їх швидкості руху призводить до чисельних дорожньо-транспортних пригод (ДТП) з великою кількістю жертв і постраждалих; додатковий фактор ризику – це поява на дорогах безпілотних транспортних засобів, при цьому існуючі системи керування рухом транспортних засобів не справляються зі зростаючим потоком машин, оскільки водії не завжди встигають реагувати на раптові зміни дорожньої ситуації, тому актуальним стає розробка методів зменшення часу сприйняття водієм керуючих сигналів і прийняття рішень щодо запобігання ДТП.

На сучасному етапі розвитку автоматизації в організації і регулюванні дорожнього руху автоматизації підлягає не лише процес управління, а й проєктування світлофорних об'єктів. З практичного досвіду можна сказати, що перелік задач, які постають перед розробниками систем автоматизованого проєктування завжди серйозно обґрунтований практичними потребами проєктувальників. Саме тому наявність у цьому списку питань, пов'язаних із розташуванням світлофорів свідчить про значну роль технічних рішень щодо розташування сигнальних пристроїв для безпечного та ефективного функціонування світлофорного об'єкту.

Так, зокрема, за даними [4, с. 180], Akcelik SIDRA Intersection є потужним програмним засобом, розробленим для моделювання, аналізу та оптимізації роботи регульованих перехресть; цей інструмент дозволяє інженерам, планувальникам та органам влади вирішувати різноманітні завдання, пов'язані з покращенням дорожнього руху та безпеки на дорогах. Основні задачі, для вирішення яких застосування Akcelik SIDRA Intersection є найбільш ефективним: оптимізація роботи перехресть, включаючи розташування та параметри світлофорів [4, с. 180].

Ключова роль правильного вибору розташування світлофорів для забезпечення безпеки дорожнього руху підкреслюється і у матеріалах публікації [5, с. 28]: ефективність руху транспорту, що впливає на час переміщення та включає в себе оптимізацію розташування світлофорів, організацію кільцевих розв'язок та інші заходи для покращення пропускну здатності.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є за результатами аналізу літературних джерел,

нормативних документів та практичного досвіду виробити рекомендації щодо розміщення транспортних світлофорів при застосуванні регулювання за окремими напрямками та щодо вибору принципів електричних схем контролю відповідності світлофорних сигналів встановленому режиму регулювання.

**Виклад основного матеріалу.** Задача забезпечення справності випромінювача червоного сигналу пов'язана із забезпеченням безпеки дорожнього руху на регульованому перехресті чи пішохідному переході під час роботи світлофорного об'єкту в режимі зміни сигналів або в режимі виклику фази транспортними засобами або пішоходами.

Відсутність червоного сигналу на транспортному світлофорі у той час, коли, відповідно до циклограми роботи світлофорного об'єкту, він повинен працювати, може призвести до ДТП. Імовірний механізм цієї пригоди буде таким: водій транспортного засобу, що наближається з другої дороги, бачить зелений сигнал; у цей час, відповідно до циклограми у напрямку регулювання, що включає траєкторію руху транспортних засобів головною дорогою, повинен бути червоний сигнал, однак, через несправність світлофорного обладнання, усі червоні сигнали транспортних світлофорів даного напрямку регулювання відімкнені. Тому водій, що рухається за напрямом головної дороги, під'їжджаючи до перехрестя, бачить відсутність будь-яких сигналів на всіх транспортних світлофорах його напрямку, отже він робить висновок про те, що даний світлофорний об'єкт не працює. Тому, керуючись п. 16.1 Правил дорожнього руху [6], сприймає перехрестя за нерегульоване і вважає, що, відповідно до дорожніх знаків пріоритету, він має перевагу у проїзді денного перехрестя перед водіями інших транспортних засобів, що наближаються з другої дороги.

В такому випадку момент виявлення небезпеки у вигляді автомобіля, що наближається з конфліктного напрямку, для кожного з цих водіїв буде запізним для того, щоб вжити ефективних заходів для зниження швидкості або об'їзду транспортного засобу, який являє собою небезпеку, і таким чином вже виникне аварійна ситуація, яка з високою ймовірністю призведе до ДТП. Тому, згідно із вимогами національного стандарту ДСТУ 4092-2002 [7, с. 14], необхідно забезпечувати переведення світлофорного об'єкту в режим миготіння жовтих сигналів у тих випадках, коли всі червоні сигнали одного напрямку регулювання вийшли з ладу.



На регульованих пішохідних переходах така ситуація також є небезпечною та може призвести до наїзду на пішоходів, оскільки пішоходи, перетинаючи пішохідний перехід в режимі жорсткого регулювання або в режимі виклику фази регулювання за допомогою пішохідного табло, проходять пішохідний перехід на дозволяючий зелений сигнал світлофора, в той-же час для транспортних засобів жодного сигналу немає, оскільки за циклограмою в цей час повинен бути червоний сигнал. Хоча в такому випадку водії транспортних засобів повинні сприймати пішохідний перехід за нерегульований та надавати перевагу в русі по цьому переходу пішоходам, однак, відповідно до вимог пункту 4.14 Правил дорожнього руху [6], пішоходи в такому випадку перед виходом на проїзну частину також повинні переконатися в тому, що транспортні засоби знаходяться на такій відстані, що їх водії можуть зупинити автомобілі перед стоп-лінією, не вдаючись до екстреного гальмування.

На даний час поширеними є дві системи електричного контролю роботи червоних світлофорних сигналів. Обидві системи побудовані на принципі контролю проходження електричного струму через червоні сигнали. Одразу слід сказати, що на даний час сам принцип такого контролю є недосконалим: контрольна схема фактично являє собою послідовну вимірювальну схему датчиків, у якій відбувається перетворення сигналів, засноване на тому принципі, що факт проходження електричного струму з величиною, що входить у заданий діапазон, через випромінювач світла червоного сигналу транспортного світлофора з високою ймовірністю означає, що сигнал працює справно. Така вимірювальна схема була достатньо надійною, коли в якості джерел світла використовувалися лампи розжарювання. Наразі більшість джерел світла в якості випромінювачів використовують світлодіодні матриці або групи світлодіодів. В такому випадку всередині світлофорних матриць також відбувається процес перетворення електричної енергії, а саме безтрансформаторний випрямляч понижує напругу 220 В змінного струму та випрямляє її, оскільки групи світлодіодів або окремі над'яскраві світлодіоди для свого живлення потребують постійного струму з фіксованою величиною електричної напруги. В такому випадку несправність може призводити до того, що світлодіодні матриці не будуть отримувати електричного струму з відповідними характеристиками, тому будуть працювати або зі зменшеною яскравістю, або не будуть працювати зовсім. При

цьому може виникнути ситуація, коли випрямляч разом із несправною матрицею у цей час все одно будуть споживати електричну енергію, отже через його первинний контур буде проходити електричний струм, величина якого може входити в діапазон, що відповідає контрольному, і на основі якого контрольний елемент може видати висновок, що сигнал працює.

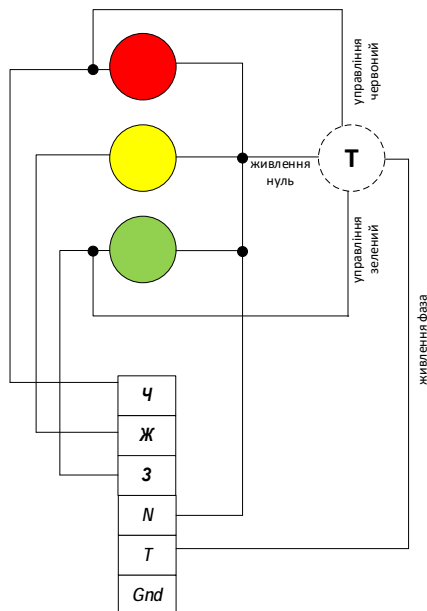
Розглянемо роботу кожної з систем електричного контролю справності сигналів. Перша система функціонує на принципі контролю величини зворотного струму від кожного з випромінювачів червоного сигналу. Для цього застосовують зворотній дріт, що поєднує випромінювачі червоних сигналів та дорожній контролер. Всередині контролера відбувається вимірювання струму, який проходить через ці зворотні дроти. Така система має очевидну перевагу у точності вимірювання, оскільки витік електричного струму на металеві конструкції світлофорного обладнання або на інші жили в кабелі не створює при застосуванні такої системи фантомного електричного струму, який може бути сприйнятий за струм від випромінювачів. Однак, така система має серйозний недолік надійності функціонування світлофорного об'єкту, пов'язаний з тим, що фазний дріт та фазна клема для червоних сигналів основного та дублюючих світлофорів даного напрямку регулювання є однією, а значить і автоматичний вимикач (запобіжник), що контролює відсутність короткого замикання по цій лінії, також є одним. В такому випадку коротке замикання в будь-якому з випромінювачів або замикання на корпус світлофорного обладнання викликає спрацювання захисту на всій лінії та відключення всіх червоних світлофорних сигналів даного напрямку, що автоматично спричиняє переведення світлофорного об'єкту в режим миготіння жовтих сигналів.

Тобто несправність всього лиш однієї матриці або однієї з гілок електричної лінії фази червоних сигналів призводить до вимикання світлофорного об'єкту і спричиняє ситуацію, яка потребує термінового реагування служби обслуговування світлофорних об'єктів та термінового введення ручного регулювання на самому перехресті. В той-же час, саме така система контролю рекомендується як провідна в сучасному національному стандарті [8, с. 10].

Другий варіант схеми функціонує на основі контролю величини електричного струму, що протікає по прямих дротах червоних сигналів. Дана схема позбавлена попереднього недоліку, але точність контролю при такому способі є меншою,

оскільки стікання електричного струму на землю або через інший випромінювач може сприйматися цією схемою як нормальний режим функціонування матриці. Особливо цей недолік загострюється у випадку застосування на транспортних світлофорах табло зворотного відліку залишкового часу тривалості сигналів. Якщо застосовується табло для червоного сигналу, то струм, який живить табло, у випадку несправності матриці червоного сигналу може давати струм, еквівалентний нормальному режиму роботи матриці.

При порівнянні двох описаних схем перевагу слід віддати другій, оскільки забезпечення точності контролю сигналів не повинно призводити до зниження надійності роботи всієї системи, однак, у разі застосування на перехресті табло зворотного відліку тривалості сигналів пропонується вдосконалити другу схему таким чином, як це показано на рис. 1, а саме додати додаткову лінію живлення для табло зворотного відліку. В результаті модифікації електричні сигнали, що відповідають світлофорним сигналам червоного та зеленого кольору будуть використовуватися лише для встановлення режиму роботи табло через гальванічну розв'язку (оптрони), а електрична потужність, необхідна для його роботи, буде приходити окремою лінією. Потужністю, що споживається оптроном, можна знехтувати у порівнянні із потужністю матриці червоного сигналу.



**Рис. 1.** Схема електрична принципова живлення світлофора Т 1.3 з вбудованим до секції жовтого сигналу табло зворотного відліку залишкового часу червоного та зеленого сигналів  
**Ч** – червоний, **Ж** – жовтий, **З** – зелений,  
**N** – нульовий, **Т** – живлення табло,  
**Gnd** – захисне заземлення

У разі використання транспортних світлофорів другого типу не менш важливим за електричний контроль справності сигналів є правильне розташування самих світлофорів.

Наприклад, для світлофорів 2.12 та 2.15 можна застосовувати дублери, розташовані, відповідно до таблиці 10 ДСТУ 4092-2002 [7, с. 13], за варіантом «б», тобто перед перехрестям над проїзною частиною, а для світлофора 2.18 дозволяється розташовувати дублери за варіантами «б» і «в», тобто перед перехрестям над проїзною частиною, а також перед перехрестям ліворуч від проїзної частини на розділовій смузі, напрямному островці чи острівці безпеки. В такому випадку виникає питання, чи допускається розташування дублюючих світлофорів таким чином, аби контурні стрілки, нанесені на червоний та жовтий сигнали цих світлофорів, та залита стрілка зеленого кольору, нанесена на нижню секцію, за своєю конфігурацією не повністю відповідали дозволеним напрямом руху з тієї смуги, над якою розташований світлофор.

Відповідь на це питання непрямо дають кілька нормативних документів. З одного боку, відповідно до абзацу третього пункту 7.27 ДСТУ 4092-2002 [7, с. 15], транспортні світлофори типу 2, розташовані над проїзною частиною (смугою руху) не дублюються, з іншого боку, відповідно до абзацу першого цього ж пункту, транспортні світлофори типів 1 та 2 потрібно дублювати, якщо рух, що регулюється цими світлофорами, здійснюється двома і більше смугами, і в конкретних умовах неможливо забезпечити виконання вимог розпізнавання сигналів відповідно до пункту 7.20 цього ж стандарту, тобто розпізнавання водіями сигналів світлофора, що регулює рух за напрямом, до якого входять траєкторії, рух якими здійснюється з відповідної смуги, визначеної дорожніми знаками 5.16 або 5.18 [9] відповідно до вимог Правил дорожнього руху.

У той же час, відповідно вимог пункту 7.23 цього ж стандарту, якщо режим роботи світлофорного об'єкта передбачає різну тривалість та (або) послідовність сигналів для окремих смуг руху, світлофори другого типу, як правило, встановлюють над кожною відповідною смугою (рис. 2).

Підбиваючи підсумки аналізу усіх наведених явних та неявних протиріч у вимогах ДСТУ 4092-2002, можна сформулювати основне питання, що його належить вирішити з метою забезпечення належного рівня безпеки дорожнього руху при застосуванні дублюючих світлофорів другого типу: чи можна розташовувати в межах смуг руху

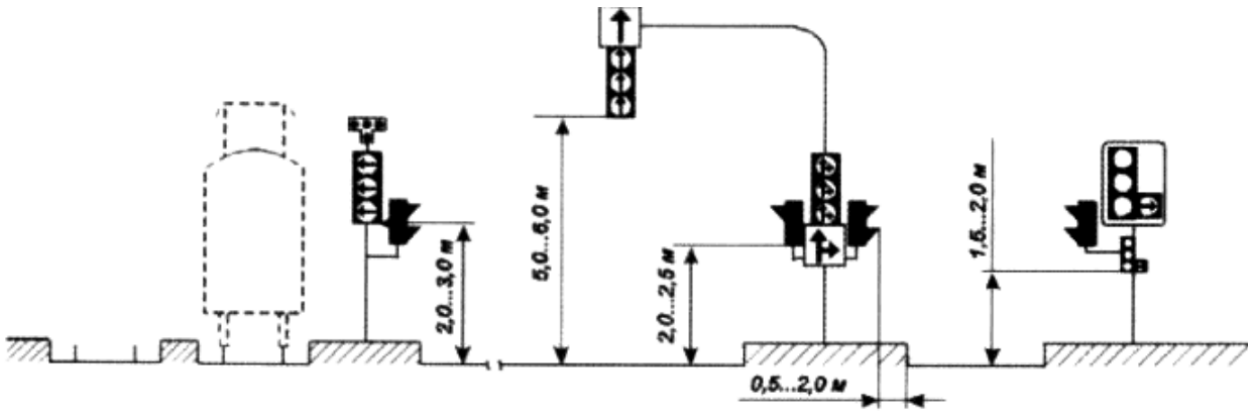


Рис. 2. Розташування світлофорів другого типу [7, с. 11]

дублюючі світлофори другого типу, конфігурація стрілок на сигналах яких не в повній мірі відповідає дозволеням напрямом руху цією смугою. Наприклад, по смузі дозволяється рух лише прямо, а дублюючий світлофор має на секціях стрілки, спрямовані прямо та праворуч.

З точки зору забезпечення безпеки дорожнього руху, такої ситуації краще оминати для того, аби не вводити в оману водіїв, для яких світлові сигнали світлофорних секцій є без сумніву більш контрастними та більш інформативними, ніж дорожні знаки 5.16 або 5.18 та дорожня розмітка. У той-же час, якщо прийняти за правило вказаний принцип, то при застосуванні світлофорів другого типу в більшості випадків на під'їздах до перехрестя будуть лише основні світлофори без дублюючих. Таке застосування світлофорів другого типу суттєво знижує електричну надійність сигнальної схеми, яка включає в себе світлодіодні матриці світлофорів, блоки їх живлення, контрольні кабелі та електричну частину дорожнього контролера. Мається на увазі, що у випадку виходу з ладу червоного сигналу хоча б одного такого світлофора другого типу перехрестя повинне переводитися в режим миготіння жовтих сигналів, оскільки за даним напрямом регулювання інших світлофорів вже немає.

Таким чином, на практиці буде мати місце доволі нестандартна ситуація, коли на одному під'їзді паралельні траєкторії руху транспортних засобів, що виходять з різних смуг руху, можуть належати до різних напрямів регулювання, наприклад на рис. 3 пряма траєкторія, що проходить першою смугою, належить до напрямку регулювання, що обслуговується світлофором типу 2.12, а пряма траєкторія руху другої смуги, що обслуговується світлофором типу 2.3 належить до іншого напрямку регулювання. Якщо

допустити такий принцип, то необхідно вводити правила щодо секвенції цих напрямків регулювання, оскільки, з точки зору інформаційного забезпечення водіїв, видається неприпустимою ситуація, коли на одному під'їзді на одному зі світлофорів рух прямо заборонений, а на іншому світлофорі рух прямо дозволений, хоча і стрілкою іншої конфігурації (прямо і праворуч).

Така ситуація є небезпечною, особливо при застосуванні автоматизованого проектування, оскільки ці напрями регулювання входять до матриці конфліктів окремо, а водій, виконуючи усі вимоги Правил дорожнього руху [6], в той же час не повинен розрізняти транспортні світлофори, що дозволяють в даному випадку рух прямо на одному під'їзді, але розташовані над різними смугами руху та мають різну конфігурацію нанесених на них стрілок. Простіше кажучи, в межах одного під'їзду стрілка одного напрямку руху повинна однозначно дозволяти чи забороняти рух в цьому напрямі руху незалежно від того, над якою смугою розташований світлофор з цієї стрілкою та яку конфігурацію вона має.

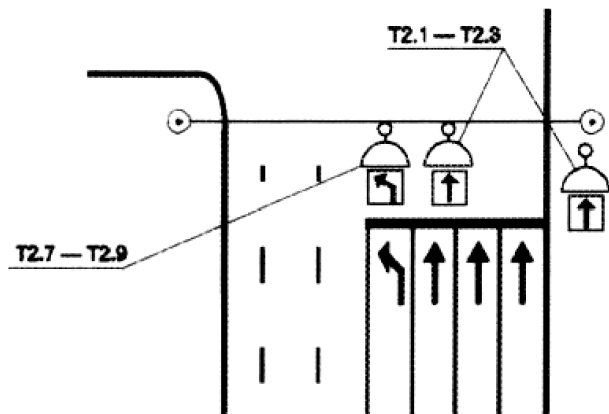


Рис. 3. Розташування світлофорів у випадку відмінностей режиму їх роботи [7, с. 15]

**Висновки.** Розглянувши вимоги ДСТУ 4092-2002 щодо застосування транспортних світлофорів типу 2 та приклади їх застосування, наведені у національних стандартах, можна зробити однозначний висновок, що протиріччя у вимогах, наведених в різних пунктах та абзацах стандарту та на рисунках повністю виключають основне призначення для застосування транспортних світлофорів типу 2, яке полягає у збільшенні рівня інформаційного забезпечення водіїв.

У разі застосування складних схем організації дорожнього руху на перехрестях з великою кількістю смуг руху у різних напрямках на одному під'їзді для уникнення таких непорозумінь необхідно однозначно

встановити, що в будь-якому випадку транспортні світлофори типу 2, які розташовуються над смугою руху або на правій та лівій межі смуги руху або праворуч чи ліворуч від смуги біля краю проїзної частини, не можуть мати стрілок такої конфігурації, яка б містила оголовок стрілки, спрямований у напрямку руху, в якому рух з даної смуги заборонений.

При формуванні сигнальних груп з транспортних світлофорів другого типу до однієї сигнальної групи дозволяється включати лише ті світлофори, конфігурація стрілок, нанесених на сигнали яких, є повністю однаковою, тобто сигнальна група, як і визначено загальним підходом, повинна складатися з основного світлофором та дублера (дублерів).

#### Список літератури:

1. Любий Є. Аналіз методів формування планів координації світлофорних об'єктів Є. Любий Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті 2.19 (2022). С. 107-122. <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal-mbf/article/view/909/863>
2. Horbachov, P. Estimation of delay on signalized intersections of urban streets with a three-phase signal. P. Horbachov, A. Makarichev, V. Shevchenko. Automobile Transport. 2019. №44. С. 30-39. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2019.44.0.30>
3. Торба А. інформаційна модель світлофора із прискореним сприйняттям сигналів. А. Торба The 1th International scientific and practical conference "Current issues of science and integrated technologies" (January 10-13, 2023) Milan, Italy. С. 751-754. DOI 10.46299/ISG.2023.1.1.
4. Самчук В.П. Використання сучасних інформаційних технологій у задачах організації дорожнього руху. В.П. Самчук Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2024. №21. С. 178-187. <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/construction/article/view/1485/1364>
5. Бабій, М.В. Проблеми організації дорожнього руху при проектуванні вулично-дорожньої мережі М.В. Бабій, І.В. Паламар, В.А. Бабій Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту» (22-24 листопада 2023 року). 2023. С. 28. <https://dspace.kntu.kr.ua/server/api/core/bitstreams/d72f40bf-99c4-490b-8f25-92838717e3eb/content#page=29>
6. Правила дорожнього руху України. – Введ. 2001–10–10 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1306-2001-п#Text>
7. ДСТУ 4092-2002 «Світлофори дорожні. Загальні технічні вимоги, правила застосування та вимоги безпеки». – Введ. 2002-06-03. – К.: Держстандарт України, 2002. – 27 с.
8. ДСТУ EN 12675^2022 «Контролери світлофорні для регулювання дорожнього руху». – Введ. 2023-02-01. – К.: Держстандарт України, 2022. – 19 с.
9. ДСТУ 4100:2021 «Безпека дорожнього руху. Знаки дорожні. Загальні технічні умови. Правила застосування». – Введ. 2021-06-03. – К.: Держстандарт України, 2021. – 144 с.

#### Trushevsky V.E. FEATURES OF THE TRAFFIC LIGHTS REGULATION IN SEPARATE DIRECTIONS LOCATION AND CONNECTION

*The article examines the existing functional electrical circuits, which are used for automatic control of the proper operation of traffic signal emitters of traffic lights (LED arrays). During the analysis of literature and practical experience, it was established that currently the most widespread are electrical circuits using return wires from LED matrices and using sensors that measure the current passing through direct wires. The advantages and disadvantages of each of these measuring schemes are studied, which generally consist in reducing the sensitivity of the scheme to fluctuations in current values due to its flow to the ground or through another light block, as well as reducing the reliability of the operation of the traffic light object and road controller in general due to the use of only one direct wire on all red signals of one transport direction regulation.*

*It is proposed to apply in practice a scheme based on the control of direct current values, subject to its improvement for intersections where red and green signal countdown boards are used in traffic lights. The improvement consists in the introduction of an additional power line to the circuit for the electric circuit of the scoreboard countdown and the introduction of galvanic separation between the red signal matrices and the electrical circuit of the scoreboard. Such an improvement made it possible to prevent a situation in which the lack of current in the monitored line of the red signal during the failure of the matrix is compensated by the current used by the countdown board for its operation. The requirements of regulatory documents for the placement of main and secondary traffic lights of the second type at the entrances to intersections where traffic is regulated in separate directions are also analyzed.*

*General principles for the placement of main and secondary traffic lights of the second type are proposed, taking into account the requirements of road traffic safety and the appropriate level of information support drivers.*

**Key words:** traffic light, lane, signal, control, direction of regulation, traffic safety, duplication, controller, LED matrix, electric current.

УДК 629.4.027

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/19>**Фомін О.В.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Баранов І.О.**

ДВНЗ «Приазовський державний університет»

**Мірошникова М.В.**

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

## РОЗРОБКА ДІАГНОСТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ТЕПЛООВОГО КОНТРОЛЮ ГАЛЬМ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

У статті реалізована технологія діагностичного забезпечення безконтактного теплового контролю гальм рухомого складу залізниць. Відповідно до концепції розвитку засобів діагностики рухомого складу, одним з перспективних напрямків розвитку є розробка системи виявлення вантажних вагонів з неефективно працюючими автогальмами. У статті встановлено, що завдання вдосконалення діагностичного забезпечення безконтактного теплового контролю колодкових гальм вантажного рухомого складу є актуальним, а також визначена відсутність вирішення питання про контроль колодкових гальм у вітчизняній практиці. Стаття присвячена виконанню досліджень щодо вибору найбільш інформативної зони на колесі для здійснення теплового контролю колодкових гальм. З'ясовано, що зона, яка рекомендується, може бути розширена за рахунок орієнтації оптики на ступицю колеса у разі розробки алгоритмів відсіювання сигналів, одержуваних при попаданні в зону контролю гальмівної колодки. У статті обґрунтовано вибір раціональних діагностичних ознак, порогових значень та розроблено алгоритми теплового контролю колодкових гальм на основі результатів досліджень, досвіду реалізації систем теплового контролю буксових вузлів вітчизняними вченими та стандартів проектування зарубіжних країн. Визначені температурні розподіли в перерізі колеса та колодках при гальмуванні зі швидкості 100 км/год з використанням чавунних та композиційних гальмівних колодок при завантаженому режимі розподільника повітря (у момент закінчення гальмування). Встановлено, що застосування систем теплового контролю колодкових гальм можливе для вирішення низки завдань, пов'язаних з оцінкою працездатності гальм та ефективності процесу гальмування. Стаття містить загальну методику проведених досліджень, яка побудована на застосуванні методу кінцевих елементів, методів аналітичної механіки, віртуального тривимірного моделювання, аналітичної геометрії, теплотехнічних вимірювань.

**Key words:** рухомий склад, колесо, тепловий контроль, колодкове гальмування, діагностика, ІЧ-випромінювання.

**Постановка проблеми.** Системи теплового контролю (СТК) колодкових гальм рухомого складу залізниць широко застосовуються за кордоном – у США, Канаді, Австралії, країнах Європейського союзу, Індії, Китаї та інших країнах. Актуальними завданнями сьогодні є: аналіз досвіду проектування та реалізації СТК у частині застосовуваних алгоритмів, діагностичних ознак та вимог, що пред'являються до СТК – ґрунтуючись на результатах проведеного чисельного моделювання, вибрати та обґрунтувати найбільш інформативну зону на колесі та порогові значення теплового контролю колодкових гальм; – розробити алгоритми теплового контролю для

застосування у вітчизняних СТК колодкових гальм [1].

Насамперед, варто запровадити поняття «гарячих» та «холодних» коліс, які повсюдно використовуються в зарубіжній літературі при описі СТК колодкових гальм. «Гарячими» вважаються такі колеса, температура яких перевищує деяке заздалегідь встановлене граничне значення для контрольованої ділянки шляху. «Холодними» вважаються колеса, температура яких значно нижча порівняно з температурою інших коліс. Обидві ознаки свідчать про неполадки колодкового гальма (невідпущене, або недіюче гальмо). Стандартом залізниці передбачено три рівні тривоги

за рівнем нагріву коліс рухомого складу: високий, середній та низький. СТК, що працюють за цим стандартом, щодо колодкових гальм мають вбудовані діагностичні моделі виявлення як гарячих, так і холодних коліс [2, 3].

За кордоном СТК колодкових і дискових гальм рухомого складу в даний час застосовуються скрізь в складі так званих комплексних систем виявлення «гарячих» коліс і буксових вузлів. Як показує проведений аналіз [2, 3, 4], у світі існує достатня кількість реалізацій СТК колодкових гальм з різними підходами до визначення технічного стану гальмівного вузла, найпоширенішим є безконтактний тепловий контроль. Тим не менш, у вітчизняній практиці за наявності багатого досвіду в реалізації теплового контролю буксових вузлів рухомого складу в даний час відсутнє вирішення питання про контроль колодкових гальм [2]. Очевидно, що рівень розвитку техніки та промисловості, особливо в галузі розробки та виробництва чутливих, швидкодіючих приймачів ІЧ-випромінювання з високою просторовою роздільною здатністю, дозволяє створити автоматичні системи для оцінки технічного стану колодкових гальм рухомого складу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження в галузі оцінки працездатності колодкових гальм нерозривно пов'язані з питаннями нагріву коліс при реалізації різних режимів гальмування. Значний внесок у дослідження цих питань зробили вчені: І.А. Жаров, С.М. Захаров, С.М. Кисельов, А.В. Саврухін, Р.А. Єфімов, В.К. Першин, А.М. Орлова, Є.А. Рудакова, А.В. Сандова, І.В. Турутін, В.В. Муравйов, Н.В. Харитонов, М.І. Глушко та багато інших. Серед зарубіжних дослідників нагрівання елементів гальмівних систем можна назвати М. Милошевича, К. Мігуру, Р. Фай, В. Гупту, М. Сігарца, Х. Тошно та інших. Дослідженнями та розробками в галузі комплексного контролю технічного стану рухомого складу та теплової діагностики їх ходових частин займалися: В.М. Алексенко, А.А. Міронов, А.Г. Алексеев, В.А. Берзін, Е.Г. Міронов, М.В. Орлов, С.М. Лозінський, В.І. Самодуров, Є.М. Розенберг та інші.

**Постановка завдання.** Відповідно до Концепції розвитку засобів діагностики рухомого складу, одним з перспективних напрямків розвитку є розробка системи виявлення вантажних вагонів з неефективно працюючими автогальмами. Впровадження подібної системи дозволить виявляти несправності гальмівних систем, що виникають у процесі експлуатації (невідпущені гальма, непра-

вильне регулювання гальмівної передачі, недіючі гальма, несправності розподільників повітря) і своєчасно їх усувати, попереджаючи виникнення аварійних ситуацій. Це завдання доцільно вирішувати, спираючись на наявний у галузі досвід реалізації систем безконтактного теплового контролю технічного стану відповідальних вузлів рухомого складу, які широко застосовуються як в Україні, так і за кордоном. Таким чином, завдання вдосконалення діагностичного забезпечення безконтактного теплового контролю колодкових гальм вантажного рухомого складу є актуальним.

Наукова новизна полягає в розробці комплексної діагностичної моделі безконтактного теплового контролю колодкових гальм рухомого складу, що дозволяє оцінювати форму та рівень сигналу, одержуваного приймачем інфрачервоного випромінювання при різних режимах гальмування рухомого складу та варіантах орієнтації інфрачервоної оптики на об'єкт контролю.

Загальна методика досліджень побудована на застосуванні методу кінцевих елементів під час аналізу процесів теплоперенесення, методів аналітичної механіки, віртуального тривимірного моделювання, аналітичної геометрії, теплотехнічних вимірювань, випробувань у реальних умовах.

**Виклад основного матеріалу.** Відповідно до системи діагностичних ознак, що стосуються моделі виявлення гарячих коліс, всі діагностичні ознаки розділені на дві категорії [4, 5]. Ознаки першої категорії (температури навколишнього середовища та колеса) так чи інакше визначаються за допомогою засобів теплового контролю. Ознаки другої категорії є наявними [6, 7]. Є два алгоритми виявлення «гарячих» коліс:

1. Якщо відносна температура колеса  $T_{OK}$  більша або дорівнює першому пороговому значенню відносної температури  $S_{OK1}$ , то СТК порівнює температуру колеса  $T_{OK}$  із середньою відносною температурою коліс по даній стороні поїзда  $T_{СОК}$ . Якщо відношення цих двох температур  $T_{OK}$  і  $T_{СОК}$  виявляється більше певного порогового значення порівняльного відношення  $X_K$ , то СТК створює тривожне показання. Математичне формулювання алгоритму має вигляд:

$$T_{OK} \geq S_{OK1}; T_{OK} / T_{СОК} \geq X_K \quad (1)$$

У разі перевищення відносної температури колеса  $T_{OK}$  другого порогового значення відносної температури  $S_{OK2}$  СТК створює відповідне тривожне показання. Математичне формулювання алгоритму наведено нижче:

$$T_{OK} \geq S_{OK2} \quad (2)$$

Описана тривожна модель «гарячих» коліс може бути представлена у графічному вигляді (рис. 1).

У процесі руху поїзда через контрольовану СТК ділянку, гальма можуть застосовуватися з різних міркувань, які продиктовані конкретними умовами експлуатації рухомого складу [5, 8, 9]. Після притискання гальмівних колодок з'являються температурні спалахи на поверхні катання колеса, потрапляння яких у зону сканування може спровокувати тривожне показання СТК. У цьому випадку зупинка поїзда для перевірки, призведе до невинуватих затримок поїздів та відчеплення вагонів [10, 11, 12]. Для виключення видачі тривожних показань за температурними спалахами пропонується ввести деякі винятки в модель виявлення «гарячих» коліс. Якщо поїзд сповільнюється з темпом, більшим за деяке встановлене значення, то порогові значення відносних температур  $S_{OK1}$ ,  $S_{OK2}$  доцільно збільшити. При цьому повинні дотримуватися такі умови:

- темп уповільнення ( $a_3$ ) повинен розраховуватися між сусідніми колісними парами на основі швидкості кожної з них;
- для всіх одиниць рухомого складу, де максимум темпу уповільнення перевищив встановлені значення, порогові значення  $S_{OK1}$  і  $S_{OK2}$  повинні бути збільшені по всіх колесах, температури яких були записані в цьому поїзді;
- порогові значення порівняльного відношення  $X_K$  залишаються незмінними.



Рис. 1. Графічне представлення тривожної моделі «гарячих» коліс

Аналізуючи викладене, бачимо, що перший з розглянутих алгоритмів враховує підвищення відносних температур коліс по всій стороні поїзда. Рівномірне підвищення температур коліс із невеликими сплесками у процесі гальмування свідчить про нормальну роботу гальмівного обладнання. Температурні сплески, абсолют-

ною величиною, що перевищують середнє підвищення температури до 3,5 разів для високого рівня тривоги, при цьому можуть бути обумовлені різними факторами, у тому числі й нескінченно великою кількістю варіантів проходження колеса через апаратуру сканування. Аномальним згідно з алгоритмом, вважається значне відхилення від середнього значення, що дозволяє загалом знизити кількість тривожних показань від СТК щодо нагрівання коліс.

Другий алгоритм є логічним продовженням першого. Попередження по другому алгоритму створюється при підвищенні відносної температури будь-якого колеса по даній стороні поїзда до 270°C (середній рівень тривоги). Це граничне значення відповідає високому рівню тривоги за першим алгоритмом. При цьому СТК створить тривожне показання в кожному випадку при досягненні будь-яким колесом температури 270°C. На основі представленої системи ознак, у роботі пропонується два алгоритми виявлення «холодних» коліс:

1. Якщо середнє підвищення температури коліс  $C_{CP}$  перевищує встановлене мінімальне значення середнього підвищення температур  $C_{CP\_min}$ , то СТК визначає склад, що рухається, як такий що знаходиться в процесі гальмування. Виходячи з відносних температур коліс  $T_{OK}$  розраховується параметр моделі «холодних» коліс за залежністю:

$$C_{CP} - \alpha \cdot T_{OK} \quad (3)$$

Якщо розраховане значення виявиться більшим за встановлений пороговий параметр моделі «холодних» коліс  $PXK_1$ , то СТК створить тривожне показання. Математичне формулювання алгоритму представимо у такому вигляді:

$$C_{CP} \geq C_{CP\_min} \text{ і } C_{CP} - \alpha \cdot T_{OK} \geq PXK_1 \quad (4)$$

2. Аналогічно до першого алгоритму проводиться перевірка складу, що рухається, на гальмування порівнянням середнього підвищення температури коліс  $C_{CP}$  з попередньо встановленим значенням  $C_{CP\_min}$ . Якщо відносна температура колеса  $T_{OK}$  вище за встановлений пороговий параметр моделі  $PXK_2$ , а середнє підвищення температури коліс  $C_{CP}$  вище за встановлений пороговий параметр моделі  $PXK_3$ , то СТК створить тривожне показання. Математичне формулювання алгоритму має вигляд:

$$C_{CP} \geq C_{CP\_min} \text{ і } T_{OK} \geq PXK_2 \text{ і } C_{CP} \geq PXK_3 \quad (5)$$

Для вантажних вагонів пропонується використовувати такі значення параметрів СТК:  $PXK_1 = 26$ ,  $PXK_2 = 11$ ,  $PXK_3 = 30$ ,  $C_{CP\_min} = 30$ ,  $\alpha = 1,4$ .

СТК колодкових гальм у багатьох країнах є складовою частиною колійної інфраструктури, яка відома під загальною назвою колійної системи технічного контролю (КСТК) [13, 14, 15]. На ділянках із затяжними спусками та підйомами потрібна підтримка щодо невисокої швидкості великовагових поїздів. Очевидно, що на таких ділянках температура всіх коліс у поїзді має значно збільшуватися, тому СТК налаштовуються на виявлення «холодних» коліс [16, 17].

Виявлення «гарячих» коліс, навпаки, доцільніше на прямих ділянках колії з невеликими ухилами, де не очікується застосування гальм поїздом, а колеса в середньому повинні мати відносно низьку температуру [18].

Приймачі ГЧ-випромінювання мають таку орієнтацію, при якій скануються обидва колеса колісної пари, що проходить. Для забезпечення точності теплового контролю температура кожного колеса наводиться до безрозмірного виду з використанням поправочних коефіцієнтів, що розраховуються окремо по кожній рейці:

$$\begin{aligned} PK_1 &= (1 + CP_2 / CP_1) / 2 \\ PK_2 &= (1 + CP_1 / CP_2) / 2 \end{aligned} \quad (6)$$

де  $PK_1$  – поправочний коефіцієнт для ближньої рейки;

$PK_2$  – поправочний коефіцієнт для дальньої рейки;

$CP_1$  – середня відносна температура коліс по ближній рейці;

$CP_2$  – середня відносна температура коліс по дальній рейці.

На рис. 2 наведено температурні розподіли в перерізі колеса та колодки при гальмуванні зі швидкості 100 км/год з використанням чавунних та композиційних гальмівних колодок при завантаженому режимі розподільника повітря (у момент закінчення гальмування).

З метою вибору найбільш інформативної зони на колесі для теплового контролю колодкових гальм рухомого складу пропонується провести детальніший аналіз повнорозмірних картин розподілу температур у колесі при різних режимах гальмування. При розгляді також враховується температурний розподіл у тілі колодки, який може істотно вплинути на результати теплового контролю колодкових гальм.

Як видно з рис. 2, використання чавунних гальмівних колодок загалом забезпечує більш сприят-

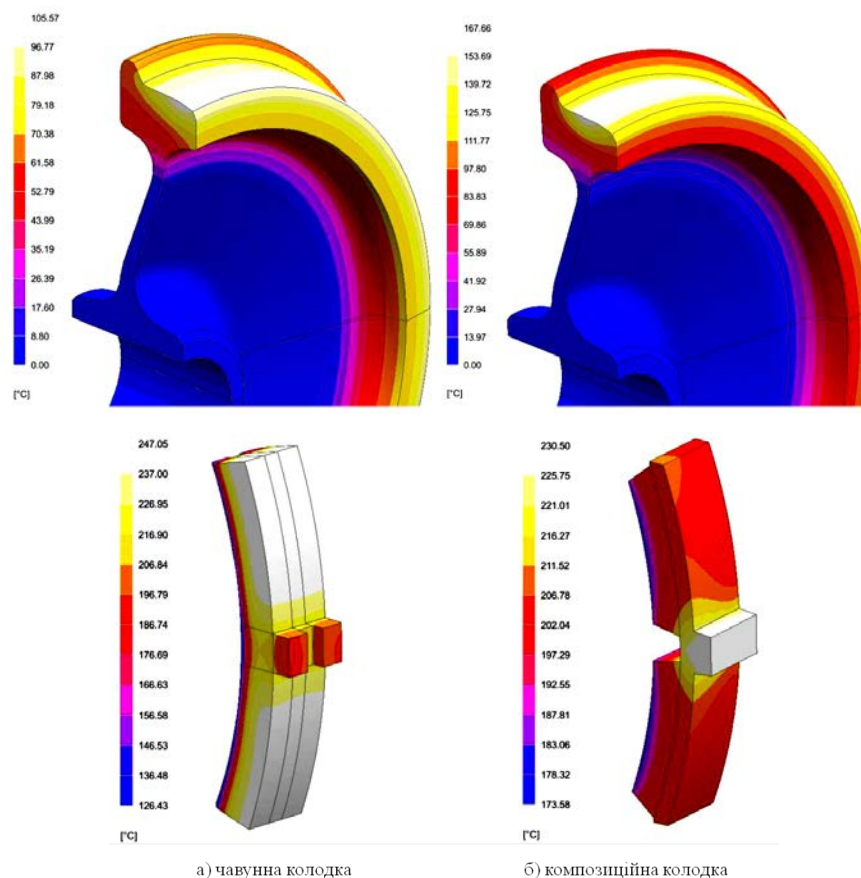


Рис. 2. Нагрів коліс та гальмівних колодок при завантаженому режимі розподільника повітря та різних типах колодок

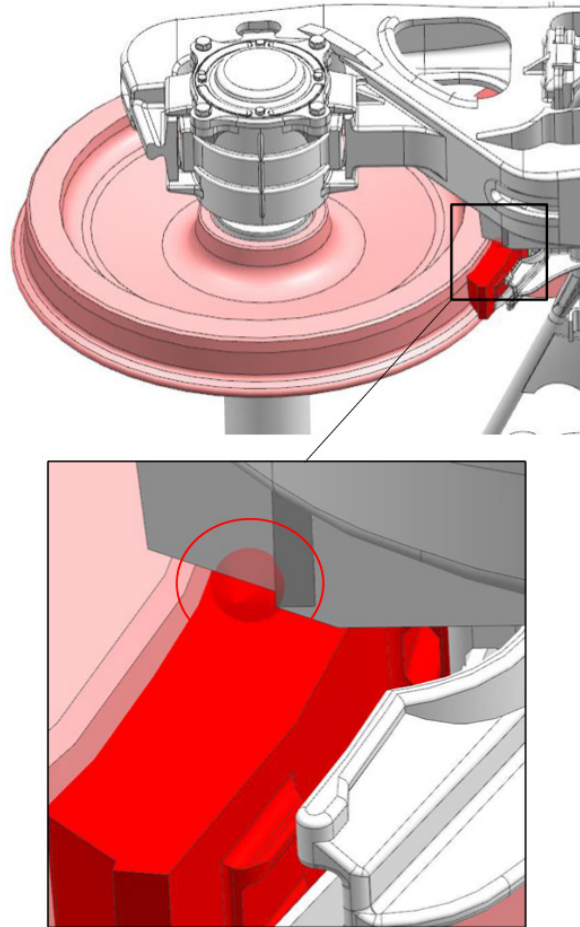


ливий температурний режим колодкового гальмування. Розподіл температур по ободу колеса має рівномірний характер без видимої зони концентрації нагріву, як це спостерігається при гальмуванні композиційними колодками. До того ж, нагрівання при використанні композиційних колодок відбувається углиб металу колеса, що обумовлено конструкцією колодки [19]. Аналіз показує, що при реалізації подібних короточасних режимів гальмування (сумарний час притискання колодок до 200 с) розподіл температур перерізу колеса прагне картин, показаних на рис. 2, а основним змінам піддається лише колірна температурна шкала і чисельні значення температур. У цьому зв'язку доцільно запровадити поняття «паттернів» [20] нагрівання колеса, що описують характер розподілу температур у колесі при реалізації різних за тривалістю режимів гальмування без вказівки чисельних характеристик цього розподілу.

Паттерни нагрівання колеса при різній тривалості процесу гальмування, згруповані залежно від типу гальмівної колодки, що застосовується, наведені в [20]. Аналіз паттернів, а також картин розподілу температур перерізу колеса в тривалих режимах гальмування, показує, що інформативною зоною для здійснення теплового контролю колодкових гальм є зона обода колеса. При цьому розташовувати приймач ІЧ-випромінювання можливо як усередині колії, так і зовні, однак при кожному з зазначених варіантів необхідно враховувати час досягнення контрольованими поверхнями нагріву, придатного для здійснення теплового контролю. Для коректного контролю необхідно мати часовий інтервал між початком гальмування та початком процесу контролю не менше 2 хвилин. За цей час температура зовнішніх поверхонь обода колеса, які не належать до поверхні катання, досягне придатних для контролю значень внаслідок явища теплопровідності. Цей факт необхідно враховувати щодо місць розміщення комплектів СТК.

Аналіз конструкції візка разом із різними варіантами орієнтації ІЧ-оптики дозволив виявити такі особливості. Орієнтація ІЧ-оптики дозволяє контролювати нагрівання поверхні катання, однак у разі невідпущених гальм до зони контролю потрапляє гальмівна колодка (рис. 3).

При відпущеній колодці в зону контролю потрапляє лише поверхня катання колеса, а гальмівна колодка закрита від скануючого променя приймача елементами бокової рами візка. З безлічі варіантів орієнтації ІЧ-оптики на контрольоване колесо пропонується виділити найбільш раціональну зону теплового контролю (рис. 4).



**Рис. 3.** Попадання в зону контролю гальмівної колодки при орієнтації ІЧ-оптики на ступицю колеса зовні колії

Як видно з рис. 4, приймач ІЧ-випромінювання рекомендується орієнтувати таким чином, щоб у зону теплового контролю потрапляв лише обід колеса та частина диска. Верхня межа рекомендованої зони обмежена висотою розташування гальмівної колодки, нижня у разі розташування приймача:

- зовні колії – рівнем головки рейки;
- усередині колії – нижньою точкою гребеня колеса.

Зона, що рекомендується, може бути розширена за рахунок орієнтації оптики на ступицю колеса у разі розробки алгоритмів відсіювання сигналів, отриманих при попаданні в зону контролю колодки. Розглянуті випадки спотворення сигналів та відхилень від нормальної параболічної форми пов'язані з потраплянням до зони контролю нагрітих гальмівних колодок. Таким чином, при відсутності розроблених алгоритмів відсіювання спотворень сигналів доцільно орієнтувати оптику в межах зони (рис. 4).

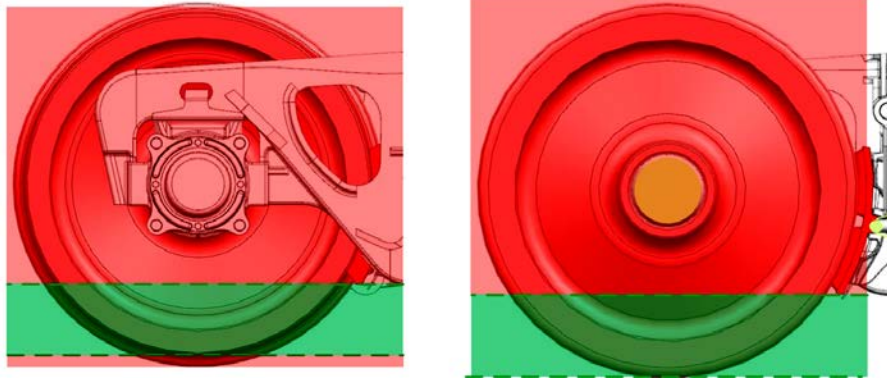


Рис. 4. Рекомендовані до застосування в СТК зони колеса для теплового контролю колодкових гальм (позначені зеленим кольором)

**Висновки.** Дослідження щодо вибору найбільш інформативної зони на колесі для здійснення теплового контролю колодкових гальм показали, що найбільш раціональною є орієнтація ІЧ-оптики в простір, верхня площина якого обмежена висотою розташування гальмівної колодки, а нижня – рівнем головки рейки або нижньою точкою гребеня колеса в залежності розташування приймача ІЧ-випромінювання. Встановлено, що зона, яка рекомендується, може бути розширена за рахунок орієнтації оптики на ступицю колеса у разі розробки алгоритмів відсіювання сигналів, одержуваних при попаданні в зону контролю гальмівної колодки. На основі результатів чисельного моделювання, досвіду реалізації СТК буксових вузлів вітчизняними вченими та стандартів проектування СТК зарубіжних країн обґрунтовано вибір раціональних діагностичних ознак, порогових значень та розроблено алгоритми теплового контролю колодкових гальм. Встановлено, що застосування СТК колодкових гальм можливе для вирішення низки завдань, пов'язаних з оцінкою працездатності гальм та ефективності процесу гальмування. У сукупності з представленими дослідженнями щодо вибору інформативної зони на колесі, порогових значень, системи діагностичних ознак та алгоритмів теплового контролю

застосування СТК колодкових гальм дозволять своєчасно виявляти неполадки гальмівних систем по нагріванню коліс, зрештою позитивно впливаючи на безпеку функціонування залізничного транспорту і зменшуючи експлуатаційні витрати.

При виконанні подальших досліджень даної теми, у деяких випадках, необхідно враховувати умови руху поїзда та контрольованих ділянок колії, наприклад: – поїзд, що проходить пункт контролю, може перебувати в процесі гальмування, у зв'язку з чим можливе значне підвищення температури коліс, – пункт контролю знаходиться на спуску і контрольований поїзд здійснив гальмування після його проходження, що також призведе до підвищення температур коліс щодо рівнинної місцевості за інших рівних умов. З точки зору оцінки працездатності колодкового гальма доцільно коригувати порогові значення контролю з урахуванням темпу уповільнення поїзда (негативного прискорення) та ухилу контрольованої ділянки колії. Корекцію порогових значень за цими ознаками доцільно поєднати з метою спрощення алгоритмів теплового контролю. При розробці алгоритмів та виборі порогових значень теплового контролю доцільно використати результати статистичного дослідження моніторингу нагріву коліс в експлуатаційних умовах.

#### Список літератури:

1. Сучасні технології в науці та освіті. Колективна монографія / під. ред. О. Б. Целішева, Г. О. Татарченко, Г. М. Хорошун. – Северодонецьк : вид-во СНУ ім. В. Даля, 2021. – 320 с. doi: [https://doi.org/10.33216/MonographSNU\(978-617-11-0211-8\)-2021-320](https://doi.org/10.33216/MonographSNU(978-617-11-0211-8)-2021-320)
2. Бондаренко, В.В. Бортова система акустичного контролю колісних пар [Текст]. В.В. Бондаренко, Д.І. Скуріхін. Залізничний транспорт України. – 2012. – № 1. – С. 32-35.
3. Hecht Markus. Innovative rail freight wagons – A precondition to increase the market-share of rail freight Markus Hecht Archives of Transport. – 2015. – Vol. 29 (1). – Pp. 17-26.
4. В.С. Джус, А.Я. Кулічепко, А.Р. Мілянч. Коефіцієнти напружень і деформацій у конструкціях вагонів. Науковий вісник НЛТУ України 14 (1), 231-236с.
5. Дьомін, Р. Ю. Розвиток методів і засобів досліджень з забезпечення технічної експлуатації залізничного рухомого складу: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.07. Северодонецьк, 2018. 40 с.

6. Płaczek M., Wróbel A., Buchacz A. (2016). A concept of technology for freight wagons modernization. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, Vol. 161. doi:10.1088/1757-899X/161/1/012107.
7. Wiesław Krasoń, Tadeusz Niezgodą, Michał Stankiewicz. Innovative Project of Prototype Railway Wagon and Intermodal Transport System. Transportation Research Procedia. 2016. Vol. 14. P. 615-624.
8. Fermer M. Finite element models: [Pap] 10th Int. Wheelset Congr. «Sharing Latest Wheelset TechnoL Order Reduce Costs and improve Railway Prod.» M. Fenner // Nat. Conf. Publ. Inst. Eng. Austral. 2020. № 92/10. P. 280-281.
9. Hot Axlebox Hot Wheel Detector System. – Manaknagar Research Designs and Standard Organization, 2012. – 18p.
10. Jamieson M. Automated Train Air Brake Effectiveness Test Process at Canadian Pacific M. Jamieson, A. Aronian International Heavy Haul Association. – Calgary, Canada, 2008. – P. 8.
11. Stellfeld J. Temperaturmessungen an hlotzgebremsten Vollraden im Fahr- betrieb/J. Stellfeld DET-Eisenbahntechn. – 2017. – №7. – P. 281-283.
12. Sitarz M. Railway wheelsets: Monografia/M. Sitarz. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Slaskiej, 2013. – 101 p.
13. Sitarz M. Metody numeryczne w projektowaniu koi kolejowych zestawow kolowych: Monografia M. Sitarz, A. Sladkowski, K. Chruzik. – Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Slaskiej NR 60, 2013. – 128 p.
14. Utterback J.J. Detection of Overheated Railroad Wheel and Axle Components J.J. Utterback, R.S. Mecca. – 2020.
15. Gallagher C.A. Infrared Hot Bearing and Hot Wheel Detector I C.A. Gallagher, – 2019.
16. Mian Z.F. Thermal Imaging-Based Vehicle Analysis I Z.F. Mian, J.C. Mullaney, Glasser, N. – 2012.
17. Ловська А. О., Фомін О. В., Рибін А. В., Лебідь Г. О. Визначення динамічної навантаженості напіввагона з замкненою хребтовою балкою, заповненою наповнювачем. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 32 (71). № 4, 2021. С. 255-259.
18. ДСТУ 7598:2014 «Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних)». – С. 162.
19. Фомін О. В., Ловська А. О. Визначення вертикальних прискорень несучої конструкції вагона-платформи з в'язкими зв'язками у повздовжніх балках. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2021, Том 32 (71). № 1, Частина 2, С. 135-140.
20. Shalupina, P.I. Transient temperatures patterns of wheel during braking P.I Shalupina, A.E. Pavlyukov, D.N. Saltykov. Materials of international conference scientific research of the SCO countries: Synergy and integration. Reports in English. Part 2. Beijing, PCR. – pp. 189-197.

#### **Fomin O.V., Baranov I.O., Miroshnykova M.V. DEVELOPMENT OF DIAGNOSTIC SUPPORT FOR NON-CONTACT THERMAL CONTROL OF RAILWAY ROLLING STOCK BRAKES**

*In article implements the technology of diagnostic support for non-contact thermal control of railway rolling stock brakes. According to the concept of development of means of diagnostics of rolling stock, one of the promising directions of development is the development of a system for detecting freight cars with inefficiently working brakes. It has been established that article of improving diagnostic support for non-contact thermal control of pad brakes of freight rolling stock is urgent. It was established that there is no solution to the issue of control of pad brakes in domestic practice. The article is devoted to research was carried out on the selection of the most informative zone on the wheel for thermal control of pad brakes. It is justified in the article recommended zone can be expanded due to the orientation of the optics on the wheel hub in the case of developing algorithms for filtering out signals received when the brake pad enters the control zone. It has been clarified results of research, the experience of implementing systems of thermal control of axle assemblies by domestic scientists and the design standards of foreign countries, the choice of rational diagnostic features and threshold values was substantiated, and the algorithms of thermal control of pad brakes were developed. The temperature distributions in the cross-section of the wheel and pads during braking from a speed of 100 km/h using cast iron and composite brake pads are shown in the loaded mode of the air distributor (at the end of braking). It has been established that the application of thermal control systems of pad brakes is possible to solve a number of tasks related to the evaluation of the performance of the brakes and the efficiency of the braking process. The article contains the general methodology of the conducted research is based on the application of the finite element method, methods of analytical mechanics, virtual three-dimensional modeling, analytical geometry, and thermotechnical measurements.*

**Key words:** rolling stock, wheel, thermal control, pad braking, diagnostics, IR radiation.

**Фомін О.В.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Шабан В.Є.**

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

**Баранов І.О.**

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

**Мірошникова М.В.**

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МІЖНАРОДНИХ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

У статті розглядається сучасний стан ринку міжнародних вантажних автомобільних перевезень та його особливості в Україні, розкриваються значення цієї галузі для країни. Наводяться статичні данні товарообігу України та проводиться їх аналіз з метою оцінки роботи митної системи. Аналізуються основні проблеми в роботі митної системи України при міжнародних автомобільних перевезеннях вантажів на сучасному етапі та наводяться можливі шляхи їх вирішення. Розглядаються чинники, що впливають на підвищення ефективності міжнародних вантажних автомобільних перевезень. Зокрема, розглядається технологія використання змінних модулів на митному терміналі. Надаються критерії при оцінці роботи митного терміналу. Встановлено, що основним показником прийняття рішень щодо перспективних заходів удосконалення перевезень є економічна ефективність, яка характеризується зменшенням витрат на доставку вантажів, прискоренням часу доставки, підвищенням рівня обслуговування. Визначені основні складові економічного ефекту при роботі митного терміналу: зменшення витрат термінальної системи, зменшення трудовитрат за рахунок оптимального розподілу вимог, які виникають в роботі митного терміналу; збільшення прибутку внаслідок підвищення пропускної здатності митного терміналу. Зроблений аналіз роботи митного терміналу при виконанні міжнародних вантажних автомобільних перевезень, запропоновано критерій оптимізації (час виконання обслуговування вимоги). Висвітлені підходи щодо вдосконалення структури митного терміналу. Функціонування роботи митного терміналу представлено в якості багатоканальної системи масового обслуговування. Визначена оптимальна кількість пунктів обслуговування в системі масового обслуговування. Представлений алгоритм визначення параметрів роботи митного терміналу, який забезпечує їх оптимальний вибір за критерієм мінімізації часу обслуговування вимог, що зменшують витрати при виконанні міжнародних перевезень.

**Ключові слова:** міжнародне перевезення вантажів, автомобільний транспорт, товарообіг, експорт, імпорт, митний термінал, ефективність роботи, критерії оцінки, система масового обслуговування.

**Постановка проблеми.** Сучасний економічний стан України характеризується зростанням значення транспорту, який забезпечує життєдіяльність населення, функціонування та розвиток економіки країни, а також підтримує її обороноздатність і сприяє досягненню зовнішньоекономічних цілей.

Війна стала серйозним випробуванням для української економіки. Найбільше постраждали експортери, оскільки основні маршрути для доставки продукції виявилися заблокованими. Наприклад, у 2022 році експорт продукції гір-

ничо-металургійного комплексу зменшився на 61,7% у порівнянні з 2021 роком. У 2023 році експорт знизився ще на 37,6% у річному вимірі, але на цю динаміку значною мірою вплинула наявність двох довоєнних місяців у 2022 році. Змінити важку ситуацію вдалося лише на початку 2024 року, адже вдалося зняти морську блокаду за рахунок функціонування морського коридору. У натуральному вираженні, протягом першого кварталу 2024 року щомісячні обсяги експорту залізної руди наблизилися до довоєнних показників [1] (рис. 1).

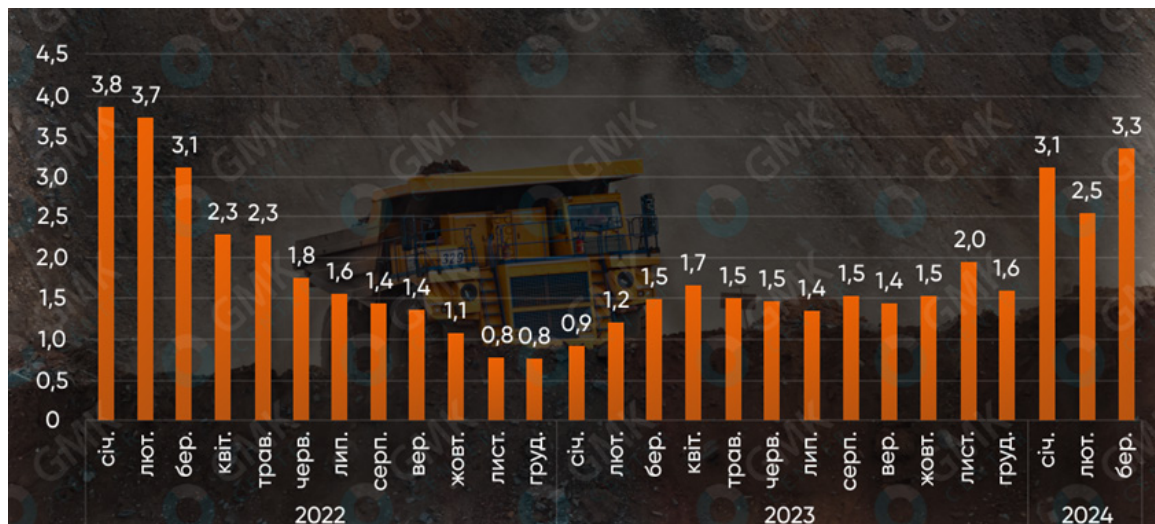


Рис. 1. Експорт залізної руди з України, млн т.

Згідно з попередніми даними інформаційного агентства «АПК-Інформ», Україна з вересня по квітень 2023/24 маркетингового року експортувала понад 4,4 мільйона тон соняшникової олії. Це на 17% більше, ніж у попередньому сезоні, і є другим за обсягом експортом в історії, поступаючись лише показникам 2019/20 років. Зростання попиту на цей продукт у поточному сезоні з боку основних світових імпортерів зумовлене більш вигідною ціною на олію в порівнянні з іншими рослинними оліями.

Щодо ситуації з імпортом – війна змушує нашу країну споживати все більше і більше енергії та ресурсів ззовні. Наші стратегічні партнери (Сполучені Штати Америки, Франція, Великобританія, Німеччина та багато інших) забезпечують постачання продовольства, зброї, медикаментів, різних видів обладнання та енергоносіїв.

Україна стала найбільшим імпортером зброї в Європі, збільшивши імпорт у 66 разів за період із 2019 року. Про це у своїй доповіді повідомляє Стокгольмський інститут дослідження проблем миру (SIPRI). Частка країни у загальносвітовому імпорті зброї становила 4,9 відсотка, а також 23 відсотки від загальноєвропейського рівня. Імпорту ліків в Україну також збільшився на 13% порівняно з 2022 роком. Найбільшим експортером стала Німеччина, на другому місці – Індія, Франція – третя [1].

У січні-серпні 2024 року в Україну імпортували товарів на суму понад \$45,1 млрд, що на 10% більше, ніж за аналогічний період минулого року, про це свідчать дані Державної митної служби. Експорт зріс на 12% – до \$27,5 млрд. порівняно з обсягом за вісім місяців 2023 року [1].

Статистичні дані, подані вище, свідчать і про збільшення тиску на митну систему України, яка наразі має безліч проблем. Однією з основних проблем є недосконала нормативно-правова база регулювання міжнародних перевезень. Суттєві відмінності між митним законодавством України та Європейського Союзу ускладнюють інтеграційний процес. Проблеми корупції та неефективності в митних органах України також значно ускладнюють процес інтеграції. Непрозорі процедури та зловживання владою можуть перешкоджати впровадженню європейських стандартів. Відсутність сучасних технологій та обладнання на митних терміналах України стає серйозним бар'єром міжнародного сполучення. Адже зумовлює використання додаткових ресурсів та збільшує час на виконання митних операцій. Багато митних терміналів в Україні потребують перепланування, а також додаткового розширення.

Актуальність цього дослідження зумовлена тим, що основним завданням системи надання послуг з міжнародних вантажних перевезень автомобільним транспортом є підвищення ефективності її роботи шляхом подальшої оптимізації структури, впровадження сучасних організаційних форм і технологій, удосконалення правових норм та посилення ролі керівних органів системи, які повинні краще відповідати вимогам ринку послуг. З кожним роком у країнах світу прискореними темпами поширюється перевезення з використанням вантажних модулів. Основою таких перевезень є термінальна система, ключовим елементом якої є термінал.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Загальним питанням ефективного функціону-

вання терміналів та термінальних систем призначені роботи Воркута А.І., Четверухіна Б.М., Поліщука В.П., Яцківського Л.Ю., Прокудіна Г.С., Коцюка О.Я., Лебідь І.Г., Шарай С.М., Кунди Н.Т., Єрєсова В.І., Кирпи Г.Н., Зайончика Л.Г. та інших. В їх наукових працях зазначені основні алгоритми функціонування транспортних систем, розроблені методи формування систем і принципи ефективної організації виробництва. Проблеми раціональної взаємодії транспортних та виробничих систем вирішуються в межах логістичного підходу.

Математичні методи оптимізації роботи термінальних систем з вибором технології організації перевезень із застосуванням програмного забезпечення використовуються, фактично, тільки науковими кадрами. Методи, які використовуються, трудомісткі, і зазвичай доступні лише розробникам.

**Постановка завдання.** Метою статті є підвищення ефективності роботи митного терміналу та удосконалення нормативно-правового регулювання процесу перевезень за рахунок використання вантажних модулів.

**Виклад основного матеріалу.** Сьогодні у багатьох країнах швидкими темпами поширюються перевезення з використанням вантажних модулів. Вантажний модуль представляє собою одиничну місткість для перевезення вантажу, яка транспортується автомобілем і не є його складовою частиною (причепи, напівпричепи, змінні кузова, контейнери тощо). Основою таких перевезень є термінальна технологія.

Для підвищення ефективності роботи митного терміналу та підвищення ефективності міжнародних вантажних автомобільних перевезень в цілому, пропонується використання змінних вантажних модулів. Такі технології, які забезпечують можливість обслуговування одним автомобілем-шасі кількох змінних вантажних модулів різного призначення, на відміну від традиційного використання звичайних вантажних автомобілів, дозволяють значно знизити експлуатаційні витрати, зменшити простої автопарку в 2–3 рази, підвищити ефективність та гнучкість його використання, а також збільшити пропускну спроможність складів і терміналів.

Можливість завантаження змінного кузова, коли сам вантажний автомобіль-шасі не перебуває на завантаженні, сприяє економії ресурсів і зменшенню витрат, зокрема щодо чисельності персоналу, часу виконання операцій та обсягу автомобільного парку. Значні технологічні переваги забезпечує багатоваріантність використання кузовів різного призначення на одному шасі

(наприклад, контейнер, вантажна платформа для перевезення техніки, цистерна, тощо) та можливість застосування одного кузова на різних однопісних шасі. Крім того, технології використання змінних кузовів у автомобільних перевезеннях дозволяють впроваджувати ефективні логістичні рішення, такі як «Just In Time» та «Lean».

Головним критерієм при оцінці роботи митного терміналу є їх пропускну спроможність, під якою розуміється «можливість одночасного розміщення транспортних засобів на майданчику, призначеному для транспортних засобів з товарами, що розміщені на тимчасове зберігання, а також транспортних засобів з товарами, що знаходяться під митним контролем. До інших критеріїв оцінки роботи митного терміналу належать обсяг товаропотоку, площа складських приміщень, площа стоянок для транспортних засобів, а також загальний час, необхідний для виконання митних операцій [2, с. 245].

Одним із головних чинників, що впливають на підвищення ефективності роботи митного терміналу є удосконалення нормативно-правового регулювання. Метою вдосконалення правового забезпечення діяльності митних органів є зниження рівня конфліктності митних правовідносин за допомогою впровадження у практику роботи сучасних інформаційних та цифрових технологій. У свою чергу, це призводить до полегшення документообігу за рахунок формування універсального передавального документа та скорочує час на оформлення необхідних документів. Скорочення часу на оформлення документів дає можливість терміналу вивільнити додаткові ресурси, що опосередковано впливає на зростання пропускну та провізної здатності митного терміналу. Удосконалення нормативно-правового регулювання зумовлює підвищення рівня довіри учасників зовнішньоекономічної діяльності до адміністративного порядку врегулювання спорів у галузі митної справи [3, с. 100].

За даними державної служби статистики використання універсального передавального документа при виконанні митних операцій на терміналі допоможе скоротити граничний час проходження митних операцій при поміщенні товарів під митну процедуру експорту для товарів, які не ідентифіковані як ризикові поставки, що потребують додаткової перевірки (з 72 години у 2023 році до 2 години до 2026 року). А граничний час проходження митних операцій при поміщенні товарів під митну процедуру випуску для внутрішнього споживання щодо товарів, які не

підлягають додатковим видам державного контролю та не ідентифіковані як ризикові поставки, що потребують додаткової перевірки (з 96 годин у 2023 році до 2 години до 2026 році) [1].

У ролі наступного чинника, що впливає на підвищення ефективності роботи митного терміналу є оптимізація витрат часу, яка може бути здійснена кількома шляхами [1].

Перший спосіб оптимізації є найбільш очевидним – це перерозподіл доступних резервів часу у межах мережевої моделі. Коли немає необхідності у розвантаженні товару, звільняються значні тимчасові резерви, які доцільно рівномірно розподілити між іншими завданнями або використувати для роботи з іншим товаром.

Другий спосіб полягає у збільшенні можливостей для одночасного виконання кількох операцій та робіт з одним товаром, а також у розширенні можливостей роботи з кількома товарними партіями одночасно. Однак це вимагає залучення додаткових співробітників, забезпечення терміналу великою кількістю технічних засобів та збільшення площ терміналу, зокрема розширення зон для огляду [4, с. 7].

Третій підхід полягає у застосуванні сучасних технологій, які допоможуть скоротити часові витрати. Особливо актуальним є використання таких технологій у процесі роботи складу та виконання складських операцій з товарами. В даний час однією з найперспективніших технологій у галузі складських послуг є використання інфрачервоних міток, які дозволяють за лічені секунди закодувати товар, визначити його місцезнаходження на складі та передати цю інформацію до бази даних. Безліч сучасних складів активно впроваджують технології штучного інтелекту для оптимізації чисельності персоналу, що, своєю чергою, дозволяє скоротити витрати на оплату праці. Крім того, такі технології значно прискорюють процес пошуку товарів на складі, так і процес їх розміщення на зберігання. Усі операції з визначення місць зберігання товарів виконуються комп'ютерною програмою, яка генерує коди для самих товарів та місць їх зберігання [5, с. 127].

Найбільш ефективним методом дослідження організації транспортного процесу є моделювання. Засобами системного аналізу встановлено, що модель транспортного процесу включає моделі транспортних потоків, складових операцій і операцій доставки вантажів [6, с. 118]. У процесі функціонування транспортних систем виникає необхідність вирішення задач, які пов'язані з роботою транспортних систем в якості мереж систем масового обслуговування різних типів. Головним призначенням транспортних сис-

тем є обслуговування споживачів транспортних послуг. Тому вирішення завдань підвищення ефективності роботи таких мереж є надзвичайно актуальним питанням розвитку транспорту в різних галузях його застосування.

Транспортна система розглядається в якості безлічі послідовно зв'язаних між собою вхідних потоків вимог обслуговування, черг, каналів обслуговування і вихідних потоків вимог [7, с. 99]. Найбільш зручним підходом до вирішення задач роботи транспортної системи є використання імітаційного моделювання, що представляє собою важливий інструмент аналізу експлуатаційних і інших характеристик транспортних систем [8, с. 142; 9, с. 255].

Важливою особливістю оперативного планування в роботі мереж систем масового обслуговування (митний термінал) є значна динамічна складова планового процесу, який вимагає застосування математичних методів та моделей при забезпеченні економічного обґрунтування рішень. Головною особливістю є здатність суб'єкта прийняття рішень, оперативно змінювати умови функціонування та критерії вирішення завдань [10, с. 79; 11, с. 135].

Основним показником прийняття рішень щодо перспективних заходів удосконалення перевезень є економічна ефективність, яка характеризується зменшенням витрат на доставку вантажів, прискоренням часу доставки, підвищенням рівня обслуговування. При роботі митного терміналу характерні деякі складові економічного ефекту:

- зменшення витрат термінальної системи, які пов'язані з інтенсивним використанням технічних та людських ресурсів;

- зменшення трудовитрат за рахунок оптимального розподілу вимог, які виникають в роботі митного терміналу;

- збільшення прибутку внаслідок підвищення пропускної здатності митного терміналу.

Показники витрат по доставці вантажу з використанням перевантажувальної ділянки на митному терміналі залежать від кількості автомобілів на ділянках і кількості вантажних модулів, які застосовуються.

Аналіз роботи митного терміналу при виконанні міжнародних вантажних перевезень дозволить запропонувати критерій оптимізації – час виконання обслуговування вимоги  $t_c$  (формула 1):

$$\tau_c = t_{\text{нак}} + t_{\text{оч}} + t_{\text{н-р}} + t_{\text{д}} \quad (1)$$

де  $t_{\text{нак}}$  – час накопичування вантажів;

$t_{\text{оч}}$  – час очікування подачі автомобіля після прийому замовлення на перевезення, час очікування обслуговування;

$t_{n-p}$  – час на виконання навантажувально-розвантажувальних операцій;

$t_0$  – час на доставку.

Проведений аналіз показав, що найбільше часу витрачається на значні затримки при перетині кордону. Дослідження, які проводилися, в основному базуються на аналізі роботи митного терміналу в якості багатофакторної системи масового обслуговування (СМО) з очікуваннями (обмеженнями) черги [7, с. 99; 12, с. 106]. Під обмеженнями черги мається на увазі відмова пропуску автомобіля через кордон, з причини невірно оформлених документів, або відсутність важливої документації. Характеристики роботи системи відповідають принципам, наведеним в [13, с. 264].

Були використані вихідні дані: статистичні дані, матеріали нормативних документів та методичної літератури, які використовуються для митного терміналу ТОВ «Н-ТРАНС», який було обрано в якості дослідної організації.

Визначені основні показники, які використовувались при моделюванні роботи терміналу.

В процесі аналізу та дослідження роботи митного терміналу в якості багатоканальної СМО, використовували програмне забезпечення [14, с. 164; 15, с. 110; 16, с. 31] за наступними залежностями:

1. Ймовірність станів системи  $P_0$  (формула 2):

$$P_0 = \left[ 1 + \rho/1! + \rho^2/2! + \dots + \rho^n/n! + \frac{(\rho^n/n!) * (\rho/n - (\rho^n/n!)^{m+1})}{1 - \rho^n/n!} \right]^{-1} \quad (2)$$

де  $\rho_i$  – навантаження на систему;

$n$  – кількість факторів, що впливають на СМО.

2. Ймовірність відмови обслуговування  $P_{відм}$  (формула 3):

$$P_{відм} = P_{n+m} = \frac{\rho^{n+m}}{n^m \cdot n!} P_0 \quad (3)$$

3. Ймовірність обслуговування, пропускна спроможність СМО  $P_{обсл}$  (формула 4):

$$P_{обсл} = q = 1 - P_{відм} = 1 - \frac{\rho^{n+m}}{n^m \cdot n!} P_0 \quad (4)$$

де  $q$  – відносна пропускна здатність СМО.

4. Пропускна здатність СМО  $A$  (формула 5):

$$A = q \cdot \lambda \quad (5)$$

де  $\lambda$  – інтенсивність вхідного потоку вимог, од./год.;

$\mu$  – інтенсивність обслуговування вимог.

5. Кількість зайнятих каналів  $z$  (формула 6):

$$z = A/\mu = \left( 1 - \frac{\rho^{n+m}}{n^m \cdot n!} P_0 \right) * \rho \quad (6)$$

6. Кількість вимог в черзі  $r$  (формула 7):

$$r = \frac{\rho^{n+m}}{n^m \cdot n!} P_0 * \left( \frac{1 - (m+1)*\rho^m + m*\rho^{m+1}}{(1-\rho)^2} \right) \quad (7)$$

де  $m$  – максимальна кількість заявок в черзі;

$X$  – кінцевий фазовий простір станів СМО.

7. Кількість вимог в СМО  $k$  (формула 8):

$$k = z + r \quad (8)$$

8. Час очікування в черзі  $t_{оч}$  (формула 9):

$$t_{оч} = r / \lambda \quad (9)$$

9. Час перебування вимоги в СМО  $T_c$  (формула 10):

$$T_c = t_{оч} + q / \mu \quad (10)$$

Визначаються характеристики СМО, за критерієм мінімізації часу при різній кількості пунктів обслуговування. Результати наведені у вигляді залежності витрат часу на обслуговування вимог від кількості каналів обслуговування (рис. 2). При збільшенні кількості каналів обслуговування митниці, витрати часу на очікування та обслуговування будуть зменшуватися. Отримані результати (рис. 3) показують відповідну залежність пропускної здатності СМО від кількості пунктів обслуговування.

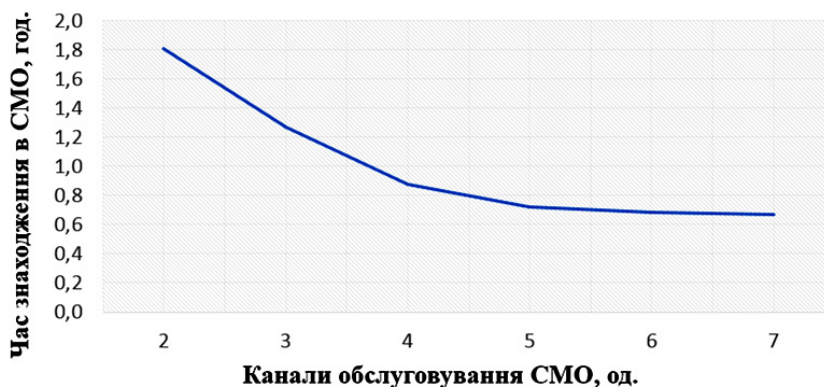


Рис. 2. Залежність часу обслуговування вимог від кількості каналів обслуговування в СМО



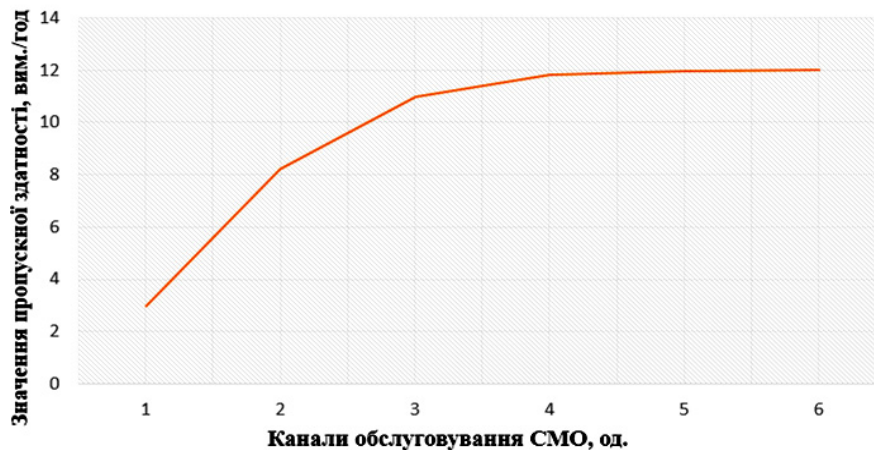


Рис. 3. Залежність пропускної здатності від кількості каналів обслуговування в СМО

Можна зробити висновок, що оптимальне значення досягається при використанні п'яти каналів обслуговування, їх збільшення не призводить до повної зміни часу знаходження вимоги в СМО. Обраний митний термінал є складною системою і його представлення потребує багатоканального підходу у вигляді СМО, при цьому функціонування кожної окремої системи (кількості пунктів обслуговування) пов'язане із загальним представленням роботи митного терміналу.

**Висновки.** Отже, основними факторами, що перешкоджають розвитку транспортного забезпечення у сфері міжнародних перевезень України, є: неструктурованість системи державного регулювання, особливо у правовій галузі щодо контролю на кордоні та збору; висока вартість послуг, що надаються митними брокерами та транспортними терміналами; низька швидкість доставки вантажів; брак комплексного, включаючи інформаційне обслуговування для організації міжнародних перевезень; а також брак і відсутність нормативно-правових актів, що регулюють міжнародні перевезення та їх обслуговування.

Дослідження актуального стану організації міжнародних вантажних автомобільних перевезень виявило, що підвищення їх ефективності та якості може бути досягнуто шляхом впровадження новітніх технологій, серед яких важливу

роль відіграє використання термінальних систем доставки вантажів із змінними вантажними модулями.

У рамках цієї статті визначено основні критерії ефективності функціонування митного терміналу в міжнародних вантажних автомобільних перевезеннях, які полягають у зменшенні часу митних процедур, що, в свою чергу, призводить до зниження загальних витрат у ланцюгу доставки вантажів, при дотриманні встановлених стандартів якості обслуговування. Використання запропонованих критеріїв у практичній діяльності сприяє оптимізації обсягів перевезень вантажів та термінів доставки.

В роботі визначені підходи щодо вдосконалення структури митного терміналу. Функціонування роботи митного терміналу представлене в якості багатоканальної системи масового обслуговування з використанням новітніх комп'ютерних програм. За результатами розрахунків рекомендоване оптимальне значення кількості пунктів обслуговування в системі масового обслуговування, яке дорівнює п'яти. Представлений алгоритм визначення параметрів роботи митного терміналу забезпечує їх оптимальний вибір за критерієм мінімізації часу обслуговування вимог, що дозволить зменшити витрати при виконанні міжнародних перевезень.

#### Список літератури:

1. Державна служба статистики України. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.ukrstat.gov.ua>.
2. Костюченко Л. М. Автомобільні перевезення у міжнародному сполученні / Л.М. Костюченко, М.Р. Наапетян. – К.: Слово, 2007. – 656 с.
3. Організація автомобільних перевезень, дорожні умови та безпека руху: навч. посіб. В.М. Герзель, М.М. Марчук, М.А. Фабрицький, О.П. Рижий. Рівне: НУВГП, 2008. – 200 с.
4. Основні напрями розвитку транспортно-дорожнього комплексу України на майбутнє. Транспортні інновації. – 2010. – №3. – С. 9.

5. Правове регулювання сфери транспорту в Європейському Союзі та в Україні: у 2-х т. Ред. В. Г. Дідик; М-во юстиції України, Державний департамент з питань адаптації законодавства. – К.: Ніка-Прінт, 2006.
6. Matthes E. Python Crash Course: A Hands-On, Project-Based Introduction to Programming [Lingua Inglese]. E. Matthes. – San Francisco, 2015. – 672 p.
7. Литвинов А. Л. Теорія систем масового обслуговування: навч. посібник А. Л. Литвинов; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 141 с.
8. Любий Є. В., Капінус С. В., Белецька О. М. Імітаційне моделювання руху транспортних засобів під час виїзду з прилеглих територій на магістральні вулиці. Вісник ХНАДУ, вип. 100, 2023. DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.100.0.136.
9. Ловська А. О., Фомін О. В., Рибін А. В., Лебідь Г. О. Визначення динамічної навантаженості напіввагона з замкненою хребтовою балкою, заповненою наповнювачем. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 32 (71). № 4, 2021. С. 255–259.
10. Капінус С.В. Імітаційне моделювання параметрів дорожнього руху у критичних ситуаціях на транспортній мережі. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. 2017. № 11. С. 79–84.
11. Фомін О. В., Ловська А. О. Визначення вертикальних прискорень несучої конструкції вагона-платформи з в'язкими зв'язками у повздовжніх балках. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2021, Том 32 (71). № 1, Частина 2, С. 135–140.
12. Любий Є.В., Белецька О.М. Експериментальні дослідження затримок транспортних засобів при виїзді з прилеглих територій. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2021. № 1 (16). С. 106–116. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v1i16.513>
13. Prassas E.S., P. Roess R. Unsignalized Intersections: Two-Way STOP Control (TWSC). The Highway Capacity Manual: A Conceptual and Research History Volume 2. Springer Tracts on Transportation and Traffic. 2020. Vol.12. Springer, Cham. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-34480-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-34480-1_4)
14. Сяєв А.В. Вступ до системи MathCAD: Навч. посібник для студ. техн. спец. А.В. Сяєв – Дніпро.: Вид-во Дніпровського нац. ун-ту ім. О.Гончара, 2018. – 208 с.
15. Troelsen A. Pro C# 7: With .NET and .NET Core. – 8-е изд. A. Troelsen, P. Japikse. – New York: Apress, 2017. – 1372 p.
16. Dutta M., Ahmed M.A. Calibration of VISSIM Models at Three-Legged Unsignalized Intersections Under Mixed Traffic Conditions. Advances in Transportation Studies. 2019. No. 48. P. 31–46. URL: <http://surl.li/frokr>

#### **Fomin O.V., Shaban V.Ye., Baranov I.O., Miroshnikova M.V. IMPROVING THE EFFICIENCY OF INTERNATIONAL ROAD FREIGHT TRANSPORTATION**

*The article examines the current state of the international freight transportation market and its features in Ukraine, reveals the importance of this industry for the country. Statistical data on trade turnover are provided and analyzed in order to assess the work of the customs system. The main problems of the Ukrainian customs system in international road freight transportation at the present stage are analyzed and possible solutions are given. The reasons influencing the increase in the efficiency of international freight road transportation are considered. In particular, the technology of using replaceable modules at the customs terminal is considered. The criteria for assessing the work of the customs terminal are provided. It has been established that the main indicator for decision-making on prospective measures to improve transportation is economic efficiency, which is characterized by a reduction in the cost of cargo delivery, acceleration of delivery time, and an increase in the level of service. The main components of the economic effect in the operation of the customs terminal are determined: reduction of terminal system costs, reduction of labor costs due to the optimal distribution of requirements arising in the operation of the customs terminal; increase in profit as a result of increasing the throughput capacity of the customs terminal. The analysis of the customs terminal operation during international road freight transportation is conducted, an optimization criterion (time of execution of the service requirement) is proposed. Approaches to improving the structure of the customs terminal are highlighted. The functioning of the customs terminal is presented as a multi-channel mass service system. The optimal number of service points in the mass service system is established. An algorithm for determining the parameters of the customs terminal operation is presented, ensuring their optimal selection according to the criterion of minimizing the time of servicing requirements, reducing costs when performing international transportation.*

**Key words:** international cargo transportation, automobile transport, trade turnover, export, import, customs terminal, work efficiency, evaluation criteria, mass service system.

## ГЕОДЕЗІЯ

УДК 332.363(477)

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/21>

### **Русіна Н.Г.**

ВСП «Рівненський фаховий коледж

Національного університету біоресурсів і природокористування України»

### **Біда П.І.**

ВСП «Рівненський фаховий коледж

Національного університету біоресурсів і природокористування України»

### **Петрова О.М.**

ВСП «Рівненський фаховий коледж

Національного університету біоресурсів і природокористування України»

### **Кушнірук О.М.**

ВСП «Рівненський фаховий коледж

Національного університету біоресурсів і природокористування України»

### **Булакевич С.В.**

ВСП «Рівненський фаховий коледж

Національного університету біоресурсів і природокористування України»

## ДО ПИТАННЯ ПРО РОЗРОБЛЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЕКТІВ ЗЕМЛЕУСТРОЮ ЩОДО ЗАХИСТУ ЗЕМЕЛЬ ВІД ЕРОЗІЇ В УКРАЇНІ

У статті представлені результати проведених теоретичних і експериментальних досліджень з розробки робочих проектів землеустрою щодо захисту земель від ерозії, включно з детальним описом науково-методичних підходів до розробки проекту, описом етапів проектування усіх компонентів – будівництва водозатримуючих валів-каналів та лучно-меліоративних заходів, описом технології будівництва протиерозійних гідротехнічних споруд. Відзначено, що протиерозійні гідротехнічні споруди призначені для боротьби з розмиванням ґрунтів, затримання стічної води та являються складовою системи протиерозійних заходів. Будівництво таких споруд відбувається відповідно робочого проекту землеустрою щодо захисту земель від ерозії. Досліджено базові нормативно-правові документи, на предмет науково-методичних підходів розробки робочого проекту землеустрою щодо захисту земель від ерозії. Встановлено, що проектування слід виконувати в дві стадії. Перша стадія передбачає топографічне знімання території у масштабі 1:1000 з висотою перерізу рельєфу 0,5 м. Друга стадія – проектування, або ж стадія безпосереднього розроблення робочого проекту землеустрою. Проаналізовано теоретичні засади проектування протиерозійних гідротехнічних споруд, а саме водозатримуючого валу-канави як земляного валу, висотою до 2 м заввишки, який розташований впоперек схилу і має перед собою ставочок. Представлено розрахунок параметрів будівництва водозатримуючого валу-канави на території Мізоцької територіальної громади Рівненського району Рівненської області та схеми поперечного перерізу водозатримуючого валу та його складових (шпор, перемичок). До основних розрахункових параметрів віднесено: площа водозбору, максимальний об'єм води з 1 га площі водозбору, висота валу, об'єм канавки, об'єм ставка, об'єм води, який затримує один погонний метр валу, довжина валу, шпор та перемичок; об'єм земляних робіт та лучно-меліоративних заходів. Визначено двоярусне розміщення протиерозійного валу-канави відповідно до вершин яру та рельєфу місцевості. Технологія будівництва валів-каналів включає геодезичні роботи з винесення основних ліній, зняття рослинного шару з елементів валу та його складування, роботи з влаштування, планування тіла валу, шпор і перемичок та сівба трав по відкосах.

**Ключові слова:** ерозія, робочий проект землеустрою, порушені землі, охорона ґрунтів, родючий шар ґрунту, малопродуктивні угіддя, документація із землеустрою, землеустрій, управління, землекористування.

**Постановка проблеми.** Головним деградаційним процесом сучасних агроландшафтів є водна ерозія ґрунтів, яка завдає величезної екологічної та економічної шкоди для багатьох країн світу та особливо Україні. За даними Державної служби України з питань геодезії, картографії та кадастру, понад 13 млн га сільськогосподарських угідь – еродовані, що становить 33,2% від їх загальної площі, у тому числі 10,6 млн га орних земель (32%). У складі еродованих земель обліковується 4,5 млн га з середньо- та сильнозмитими ґрунтами, в тому числі 68 тис. га тих, які повністю втратили гумусовий горизонт. Крім площинної ерозії, спостерігається інтенсивний розвиток процесів лінійного розмиву та яроутворення, які негативно впливають на понад 1 млн га території [1].

У різних регіонах країни площа прояву ерозійних процесів та їх наслідків є різною. Наприклад у Рівненській області найбільш поширеним видом деградації є водна ерозія – 56% з усіх її видів. Крім того, зростають площі середньо і сильно змитих ґрунтів, що становить 123,8 тис. га, а з них потребують консервації 103,3 тис. га [4]. Одним із шляхів покращення ситуації в даній проблематиці є впровадження ґрунтозахисних систем землеробства, схем зі збереженням природної родючості ґрунтів, проектного планування території, які обов'язково повинні включати комплекс протиерозійних заходів. На сьогодні, у Рівненській області діє Регіональна програма розвитку земельних відносин у Рівненській області на 2023–2025 роки, пріоритетним завданням якої – проведення заходів з охорони земель, консервації деградованих, малопродуктивних, техногенно-забруднених угідь, їх рекультивация та поліпшення. Здійснення чого потребує розробки робочих проектів із землеустрою, на розробку яких виділено 122200,00 тис. грн із обласного бюджету. [6], що свідчить про зацікавленість держави та місцевих громад у вирішенні даного питання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасних наукових дослідженнях щодо поліпшення стану сільськогосподарських угідь, захисту земель від ерозії вчені розкривають питання екології землекористування [7], збереження ґрунтових ресурсів методом землевпорядкування, що зазнали руйнування внаслідок ведення воєнних дій [8], удосконалення організаційно-економічного механізму формування еколого-безпечного землекористування [9], проектування ґрунтозахисних та меліоративних заходів в агроландшафтах [10]. Варто відміти роботи присвячені науково-методичним підходам до розроблення

робочих проектів землеустрою як А. Мартина, І. Колганової, А. Кошель, О. Кемпи, А. Стачерзак, С. Осипчук, М. Козак та Л. Остапчук. У той же час, питання щодо розроблення документації із землеустрою щодо захисту земель від ерозії є порівняно малодослідженим.

**Постановка завдання.** Метою статті є висвітлення методичного підходу до розробки робочих проектів землеустрою щодо захисту земель від ерозії, включно з детальним описом підходів до розробки проекту, описом етапів проектування усіх компонентів – будівництва водозатримуючих валів-каналів, описом технології будівництва гідротехнічних споруд.

**Виклад основного матеріалу.** З метою цілеспрямованої боротьби з ерозією ґрунту в Україні розроблено Генеральну схему протиерозійних заходів [11, с. 68], яка передбачає комплекс заходів із запобігання та усунення негативних наслідків ерозії ґрунтів. Гідротехнічні заходи як важливий елемент протиерозійної системи направлені на боротьбу із розмиванням ґрунтів стічною водою із водозбірної площі. Їх здійснюють переважно в гідрографічній зоні шляхом створення додаткових водозатримувальних валів, укріплення вершин ярів, їх дна і відкосів. Будівництво таких споруд відбувається відповідно робочого проекту землеустрою щодо захисту земель від ерозії. Метою якого є розроблення конкретних агротехнічних протиерозійних та інших ґрунтоохоронних заходів, які повинні здійснюватися під час використання земель усіх категорій, зокрема під час вирощування всіх сільськогосподарських культур на кожному полі та його робочих ділянках на кожен рік ротації сівозміни з метою підвищення родючості ґрунтів і збільшення врожайності культур [13].

Об'єктом даного дослідження виступила земельна ділянка, що потребує захисту земель від ерозії, розташована в адміністративних межах Мізоцької територіальної громади Рівненського району Рівненської області. Загальна площа проведення протиерозійних заходів становить 0,9768 га, з них засівається багаторічними травами – 0,5088 га. Важливим елементом вихідних даних є характеристика рельєфу місцевості. На площі об'єкту проектування рельєф горбистий із поперечно-вігнутих, поздовжньо-прямих схилах з паралельними горизонталями з крутістю 6° при заляганні ґрунтових вод на глибині понад 5 м, які не мають впливу на процес ґрунтоутворення.

Робочий проект землеустрою щодо захисту земель від ерозії передбачає структуру: техніко-

економічні показники, пояснювальну записку, додатки, розрахунки кошторисної вартості щодо впровадження запроектованих заходів з охорони земель, графічні матеріали [13]. Під час розроблення заходів щодо захисту земель від ерозії передбачено проектування водозатримуючих валів-каналів. Основні проектні рішення щодо проектування водозатримуючих валів-каналів складалі: встановлення параметрів валу-канави та його складових валу, ставочка, перемичок і шпор; розрахунок об'ємів земляних робіт; розміщення на плані проектних елементів; технічне забезпечення проектних робіт; проектування лучно-меліоративних заходів; технологію будівництва валів-каналів.

Водозатримуючий вал-канави – це земляний вал, висотою до 2 м заввишки, який розташований впоперек схилу і має перед собою ставочок (рис. 1).

Він складається з валу, ставочка, перемичок і шпор. Особливо ефективні такі споруди при закріпленні верхів'я діючих ярів. Довжина валу залежить від площі водозбору й об'єму стоку. При значній довжині валу його проектують у 2–3 ряди. Об'єм води, що затримує один погонний метр вал-канави, і довжина шпор залежать від ухилу схилу. Так, для ухилів 5...8° один погонний метр може затримувати 5...8 м<sup>3</sup> води. За обсягом зливого стоку визначається і довжина валу. За типом і конструкцією валів-каналів найбільш ефективними є вали трапецієвидної форми перерізу і канави у формі трикутника, які насипають і вирізають бульдозерами, що було вибрано за основу проекту.

Розрахунок параметрів валу потребує проведення топографічного знімання території у масштабі 1:1000 з висотою перерізу рельєфу 0,5 м. В особливих випадках, при складному хвиляс-

тому рельєфі, знімання проводять у масштабі 1:1000 з висотою перерізу рельєфу 0,5 м (рис. 2).

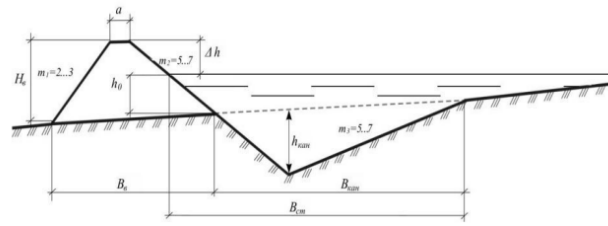


Рис. 1. Схема поперечного перерізу валу-канави:  $H_v$  – висота валу, м;  $h_0$  – робоча висота валу, м;  $\Delta h$  – перевищення гребня валу над робочою висотою, м;  $a$  – ширина гребня валу, м;  $h_{кан}$  – глибина канави, м;  $B_v$  – ширина основи валу, м;  $B_{кан}$  – ширина канави, м;  $B_{ст}$  – ширина ставка, м;  $m_1, m_2, m_3$  – закладення верхнього, низового відкосу валу та мокрого відкосу канави [14]

Важливо, що знайдений розрахунковий об'єм стоку повинен затримуватися валом-канавою з певною довжиною ( $L_0$ ) та висотою валу ( $H_0$ ). На початку визначається площа водозбору даної вершини яру за планом у горизонталях. Потім за формулою 1 розраховують максимальний об'єм води з 1 га площі водозбору:

$$Q_{зл} = 10000 \cdot F \cdot m \cdot K, \quad (1)$$

де  $Q_{зл}$  – максимальний об'єм води під час зливи, м<sup>3</sup>;  $F$  – площа водозбору, га;  $m$  – величина максимальної зливи за 5 чи 10% забезпеченості що становить 0,04–0,07 м (для південного заходу – більше значення, а північного сходу – менше), м;  $K$  – коефіцієнт стоку (для схилів 1–5° дорівнює 0,40–0,85 (залежить від механічного складу ґрунту)).

Розрахунок висоти валу ( $H_v$ ) був проведений за формулами [14]:

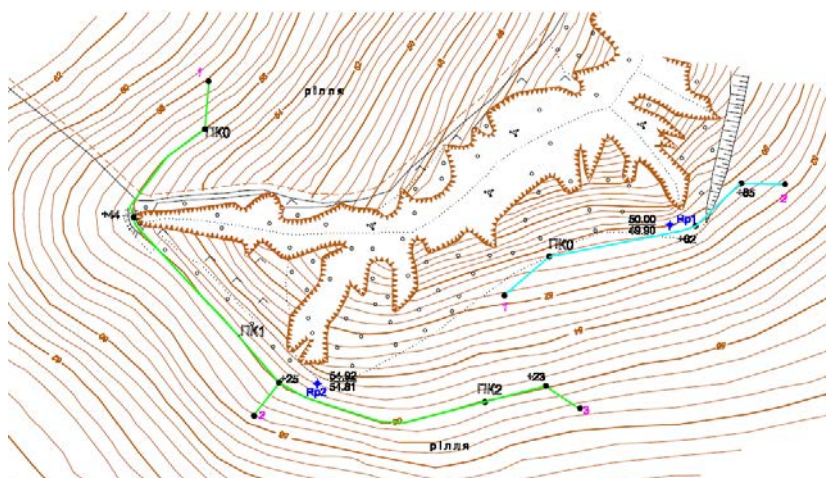


Рис. 2. План топографічного знімання земельної ділянки Мізоцької територіальної громади Рівненського району Рівненської області

ТАБЛИЦЯ ПРИВ'ЯЗКИ

№ № станції	№ № точок	Висхідні кути	Довжини по відкриттям у м
<b>Водозатримуючий вал-канави ВЗ-9а</b>			
Rp1 54.82 54.81	Rp1	0°00'	139.0
	1	272°50'	114.8
	ПК0	288°00'	86.1
	+44	246°00'	89.0
	ПК1+25	194°55'	14.0
	2	32°00'	69.9
	ПК2+23	25°00'	81.1
	3	30°00'	84.7
<b>Водозатримуючий вал-канави ВЗ-9б</b>			
Rp1 50.00 49.90	Rp2	0°00'	139.0
	1	1°00'	87.1
	ПК0	8°15'	47.0
	+82	214°00'	7.0
	+85	174°15'	28.3
	2	186°00'	43.0

$$H_B = h_0 + \Delta h, \text{ м} \quad (2)$$

де  $h_0$  – робоча висота валу, м;  $\Delta h$  – перевищення гребня валу над робочою висотою, м.

Рекомендовані перевищення гребня валу над робочою висотою, якщо  $h_0 - < 1 \text{ м} = \Delta h - 0,2 \text{ м}$ ;  $h_0 - 1 \dots 2 \text{ м} = \Delta h - 0,3 \text{ м}$ ;  $h_0 - 2 \dots 3 \text{ м} = \Delta h - 0,4 \text{ м}$ .

Далі приймаємо наступні параметри – трапецієвидний поперечний переріз валу з шириною по верху  $a = 2,5 \text{ м}$ , коефіцієнтом закладання низового укосу  $m^1 = 2$ , верхового  $m^2 = 3$ ; висота валу  $H = 2,23$ , перевищення гребня валу над НІПР –  $0,25 \text{ м}$ , над ФІПР –  $0,1 \text{ м}$ . При цьому глибина води у ставку перед валом при НІПР буде становити  $h = H - 0,25 \text{ м}$ .

Вал насипається з ґрунту, який виймається з канавки перед валом. Об’єм канавки  $W_k$  дорівнює об’єму тіла валу  $W_v$ . Кожний метр довжини валу затримує об’єм води  $W_1$ , який дорівнює сумі площ канавки і ставка (табл. 1) та визначається за формулами (3, 4, 5) відповідно рисунку 2.

$$W_k = \frac{2a + (m_1 + m_2) H}{2} H \quad (3)$$

$$W_{cm} = \frac{1}{2} \left( m_2 \cdot h + \frac{h}{i} \right) h \quad (4)$$

$$W_1 = W_k + W_{cm} \quad (5)$$

Таблиця 1

**Результати розрахунку об’ємів канавки і валу**

№п/п	$a$	$m_1$	$m_2$	$H$	$h$	$i$	$W_k$	$W_{cm}$	$W_1$
1	2,5	2	3	2,23	1,83	0,11	18,01	13,34	31,5

Якщо 1 м валу затримує  $31,35 \text{ м}^3$  води, то затримання  $9500 \text{ м}^3$  (табл. 1) потрібний вал довжиною  $308,0 \text{ м}$ .

Вал доцільно розміщувати на незручній для обробки території схилів між ярами. У такому випадку вода від вершин буде спрямовуватись до валу водовідними канавами. При аналізі на плані конфігурації і розмірів між’ярусної ділянки виявляється, що вал такої довжини розмістити не можна, тому передбачаємо двоярусне розміщення валів, сумарна довжина яких буде становити  $308,0 \text{ м}$ . Нижній вал проектуємо довжиною  $85,0 \text{ м}$ , а верхній  $308 - 85 = 223 \text{ м}$ . Тоді об’єм води, що затримується верхнім валом, буде становити  $31,35 \cdot 223 = 6991,05 \text{ м}^3$ , а нижнім  $31,35 \cdot 85,0 = 2664,75 \text{ м}^3$ .

Відстань між валами приймаємо трохи більшою, ніж ширина ставка занижнім валом  $l_{ст} = h : i = 1,25 : 0,05 = 25$ , приймаємо  $30 \text{ м}$ .

Вали трасуємо вздовж горизонталей, щоб забезпечити однакову їх висоту по довжині. По кінцях валів під кутом  $110^\circ \dots 130^\circ$  проектуємо шпори, які

разом з валом утворюють чашу ставка і утримують нагромаджену воду. Ставок, що утворився за валом, ділимо на дві секції земляною перемичкою, яка попереджує скид всього об’єму води з ставка у випадку прориву валу. Гребінь перемички влаштовуємо на рівні гребення валу і шпор. У правій шпорі верхнього і лівій шпорі нижнього валу влаштовуємо водообходи для організованого відведення води із-за верхнього валу до нижнього, а із-за останнього – на небезпечний відносно розмивання схил. Необхідність відведення води із-за нижнього валу на схил може виникнути у тому випадку, коли об’єм стоку перевищить розрахунковий [16].

Загальна довжина перемичок визначається за формулою 6 [16]:

$$P = \frac{L}{40} \cdot b \quad (6)$$

де  $P$  – загальна довжина перемичок, м;  $L$  – довжина валу, м;  $b$  – ширина гребеня валу, м;  $40$  – відстань, на якій одна від одної найчастіше влаштовують перемички, м.

Сумарну довжину валу з урахуванням перемичок розраховують за формулою 7 [16]:

$$L_{\text{сум}} = L + P \quad (7)$$

де  $L_{\text{сум}}$  – сумарна довжина валу з урахуванням перемичок, м;  $L$  – довжина валу, м;  $P$  – загальна довжина перемичок, м.

Відстань між сусідніми валами визначають за формулою 8 [16]:

$$l = \frac{H_3}{i} \quad (8)$$

де  $l$  – відстань між сусідніми валами, м;  $H_3$  – загальна висота валу, м;  $i = \text{tg} \alpha$  – величина схилу (в тангенсах).

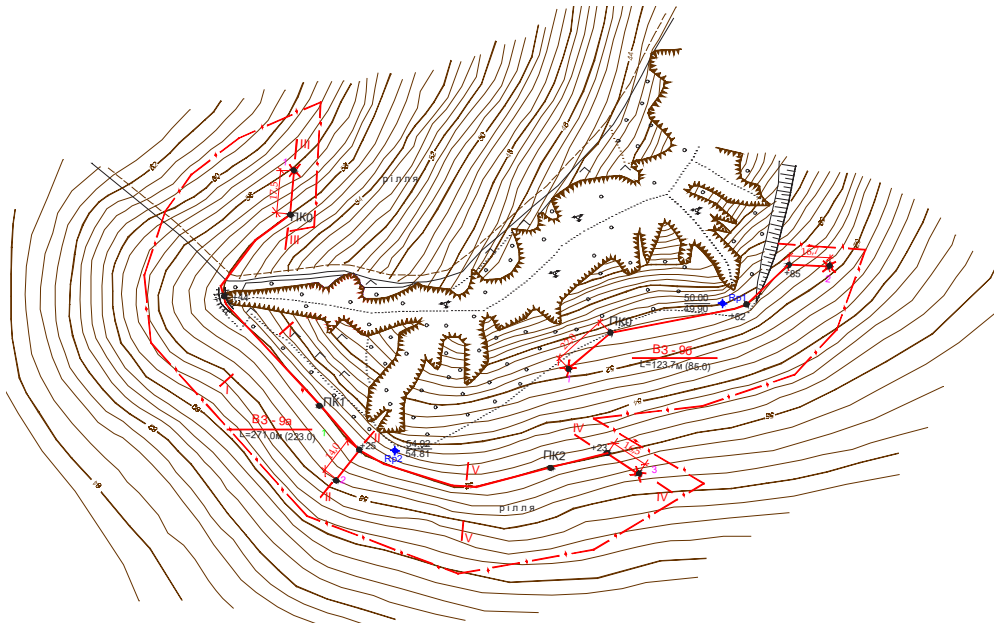
Після проведених розрахунків були визначені розміри основних елементів (табл. 2).

Таблиця 2

**Розміри основних елементів водозатримних валів**

Найменування валу та його елементів		Довжина, м
ВЗ-9а	Вал	184
	ШВ-1	17,5
	ШВ-2	16,5
	П	14,0
Всього по ВЗ-9а		271,0
ВЗ-9б	Вал	85,00
	ШВ1	16,7
	ШВ-2	22,00
Всього по ВЗ-9б		123,7

Водозатримувальні вали з широким гребенем розміщуються поблизу вершини яру на відстані трьох його глибин. Розраховуються, як правило, на повне затримання стоку (рис. 4).

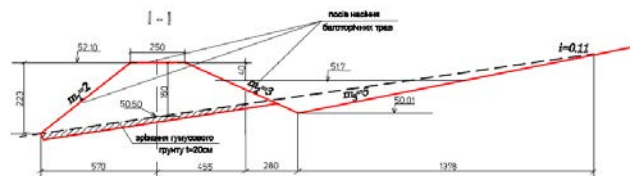


**Рис. 3. Схема проектного розміщення водозатримних валів на території Мізоцької територіальної громади Рівненського району Рівненської області**

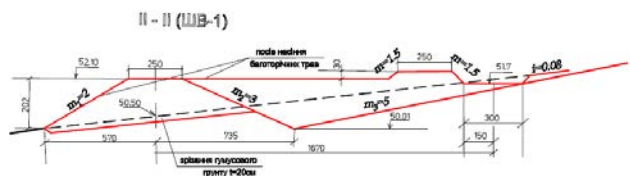
Вали розташовані на прияружній ділянці. У цьому випадку водозатримуючі вали займають малоцінну в господарському відношенні землю і не заважають механізованому обробітку ґрунту на усій площі водозбору. Як показує досвід, застосування багаторядної системи водозатримуючих валів біля вершин ярів економічно неефективно, оскільки значні площі земель виключаються з сільськогосподарського використання. Для затримання великого об'єму стоку, то створюють один вал, причому розташовують його нижче вершинного перепаду (рис. 3). Вершинна частина яру, відсічена валом, в цьому випадку виположується. Вали роблять трикутного поперечного перерізу з коефіцієнтами укосів – сухим – 2, мокрим – 5. Через 100 м уздовж валу роблять перемички теж трикутного профілю з коефіцієнтом укосів 5. Такий профіль валу і перемичок дозволяє обробляти ложе ставочка.

Гребінь валу проектують строго горизонтальним і таким, що дещо височіє над розрахунковим рівнем води, для того щоб уникнути переливання і перехлюпування води через нього. Кінці валів виведені вгору по схилу – створюючи шпори, які сполучаються з валом під кутом 100–120°. Передбачено шпори – глуху (закриту) та відкриту, у кінці якої влаштовано водозлив (водовипуск). Водозливи трапецієподібної форми запроєктовані для пропуску зайвого стоку від верхнього валу до нижнього. Їх розміщено на обох кінцях валу. Для кращого утримання притікаючої води влаштовано перемички того ж профілю, що і шпори. Їх розташовують під прямим кутом до осі валу через 50-100 м. Гребінь перемички до середини ставочка

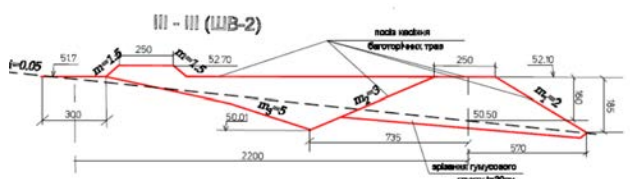
роблять на одній висоті з гребенем валу, а далі, до примикання кінця перемички до поверхні землі, на 20–30 см нижче рівня води у ставочку. Розрахункова довжина валу – по ВЗ-9а – 271,0 м, а ВЗ-3б – 123,7 м. Робочі величини проектних валів показано на поперечних перерізах (рис. 4, 5, 6, 7, 8). Перший вал від вершини яру розташовують на відстані трьох глибин вершинної частини яру.



**Рис. 4. Поперечний переріз водозатримуючого валу 1**



**Рис. 5. Поперечний переріз шпори 1 водозатримуючого валу 1**



**Рис. 6. Поперечний переріз шпори 2 водозатримуючого валу 1**

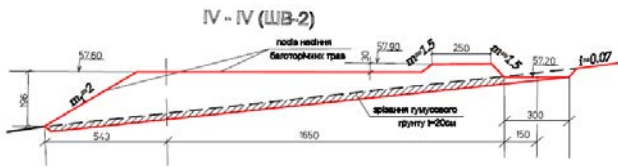


Рис. 7. Поперечний переріз перемички водозатримуючого валу 1

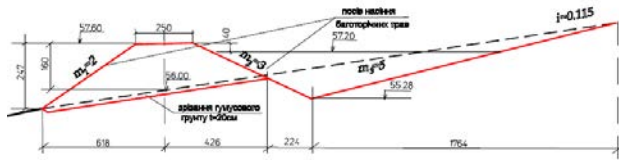


Рис. 8. Поперечний переріз водозатримуючого валу 2

Розрахунок об'єму земляних робіт здійснювався за методикою [14] і представлений в таблиці 3.

Під час насипання валів-терас передбачено використання терасерів, бульдозеру, автогрейдера.

Технологія будівництва валів-каналів складається із наступних операцій і процесів [15]: «розбивка осі валу, шпор, перемичок, винесення в натуру лінії (кордонів) підосви мокрого і сухого укосів, а також межі прудка; зрізання бульдозером рослинного шару на глибину 20–25 см з площі основи прудка, вала та шпор та тимчасового зберігання його за межами площі будівництва валу; розробка ґрунту в прудочку бульдозером з наступним переміщенням його у тіло вала та шпор; облаштування валу та шпор бульдозером з впусканням основи, ущільненням, розрівнюванням,

зволоженням ґрунту та зрізанням бахроми; планування відкосів і полотнища насипів; сівба трав по відкосам та гребеню вала і шпор».

**Висновки.** На сьогоднішні робочі проекти землеустрою щодо захисту земель від ерозії мають важливе значення для підвищення ефективності використання охорони земель, створення сприятливих умов для ведення господарської діяльності. В ході виконання дослідження були розглянуто методичні підходи розробки робочих проектів землеустрою. Детально представлено будову водозатримуючого валу-канави, який є ефективним при закріпленні верхів'я діючих ярів. Дана проектна документація включає детальний розрахунок параметрів валу-канави, серед яких найважливіші є довжина та висота вала. Довжина споруди буде залежати від об'єму стоку, який буде затримувати один метр погонний валу-канави. Вали-канави розміщують на водозбірній площі вище вершини яру, а трасують вздовж горизонталей, щоб забезпечити однакову їхню висоту по довжині. Якщо вал-канавка має довжину більше 300 м, або не можливо розмістити за проектною довжиною та захистити два бокових верхів'я яру, тоді передбачають в основному верхів'ї яру двоярусне розміщення валів, а в бокових одноярусне. Відстань між валами приймаємо 30 м [14]. Технологія будівництва валів-каналів включає геодезичні роботи з винесення основних ліній, зняття рослинного шару з елементів вала та його складування, роботи з влаштування, планування тіла валу, шпор і перемичок та сівби трав по відкосах.

Таблиця 3

Об'єм земляних та проектних робіт з облаштування валу та ставка

Найменування валу та його елементів	Довжина, м	Зрізання гумусового шару		Влаштування тілу валу, перемичок і шпор		Планування поверхні валу, ставка, переміщення шпор		Покриття гумосовим ґрунтом поверхні валу, ставка, переміщення шпор			Посів насіння багаторічних трав, м <sup>2</sup>	
		Віддаль переміщення, м	Об'єм, м <sup>3</sup>	Віддаль переміщення, м	Об'єм, м <sup>3</sup>	Механізоване, м <sup>2</sup>	Вручну, м <sup>2</sup>	Віддаль переміщення, м	Об'єм, м <sup>3</sup>			
									Механізоване, м <sup>2</sup>	Вручну, м <sup>2</sup>		
ВЗ-9а	Вал	223,0	30	1197	20	2392	6467	40	30	1189	8	3122
	ШВ-1	17,5	30	112	20	90	144	10	30	110	2	154
	ШВ-2	16,5	30	103	20	85	136	10	30	104	2	146
	П	14,0	30	90	20	72	116	20	30	86	4	136
Всього по ВЗ-9а		271,0		1505		2639	6863	80		1489	16	3558
ВЗ-9б	Вал	85,0	30	456	20	874	2465	20	30	452	4	1190
	ШВ-1	16,7	30	22	20	86	138	10	30	20	2	146
	ШВ-2	22,0	30	28	20	113	182	10	30	26	2	192
Всього по ВЗ-9б		123,7		506		1073	2785	40		498	8	1530



## Список літератури:

1. Коробська А.О. Державне регулювання використання земель сільськогосподарського призначення в Україні : дис. . канд. економ. наук : 08.00.03. Кам'янець-Подільський, 2020. 255 с. <https://pdatu.edu.ua/images/naukova-miznarodna-diyalnist/svr/dissertaciya-korobaska.pdf>
2. Доповідь про стан навколишнього природного середовища в Рівненській області у 2023 році. URL: [https://www.ecorivne.gov.ua/report\\_about\\_environment/](https://www.ecorivne.gov.ua/report_about_environment/)
3. Регіональна програма розвитку земельних відносин у Рівненській області на 2023-2025 роки. URL: <https://ror.gov.ua/upload/content/2024/February/F8zN6oM3.pdf>
4. Екологія землекористування : навч. посіб. / А.М. Третяк, О.С. Будзяк, В.М. Третяк та ін. ; за заг. ред. Третяка А.М. – К. : Інститут екологічного управління та збалансованого природокористування, 2017. – 178 с.
5. Дорош О., Дорош Й., Фоменко В. Збереження ґрунтових ресурсів методом землевпорядкування, що зазнали руйнування внаслідок ведення воєнних дій. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*. 2023. №3. С.14-22.
6. Купріянич І. П. Удосконалення організаційно-економічного механізму формування екологобезпечного землекористування. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*. 2023. №1. С.86-94.
7. Булигін С.Ю. Проектування ґрунтозахисних та меліоративних заходів в агроландшафтах: навчальний посібник /С.Ю.Булигін, В.І.Бураков, М.М.Котова та ін. Київ: НАУ, 2004. 114 с.
8. Кошель А.О., Колганова І.Г., Кемпа О., Стачерзак А., До питання про розроблення робочих проектів землеустрою щодо поліпшення стану сільськогосподарських угідь та захисту земель від ерозії в Україні. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*. 2023. №3. С.23-31
9. Смарт методи управління родючістю ґрунтів : навчальний посібник для аспірантів спеціальності 201 – Агрономія / Укл.: Шевченко М.С., Десятник Л.М. Дніпро: ДУ ІЗК НААН, 2019. 176 с. URL: [https://institut-zerna.com/education/docs/silabus\\_fahcompetentions/navchalniy-posibnyk.pdf](https://institut-zerna.com/education/docs/silabus_fahcompetentions/navchalniy-posibnyk.pdf)
10. Про затвердження Правил розроблення робочих проектів землеустрою: Постанова Кабінету Міністрів України від 02.02.2022 р. № 86. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/86-2022-%D0%BF#Text>
11. Козішкурт С.М., Турченко В.О., Волкова Л.А. Методичні вказівки для практичних занять і самостійної роботи з навчальної дисципліни «Облаштування водозборів» для здобувачів освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології» спеціальності 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології» денної та заочної форм навчання. Рівне: НУВГП, 2021. 42 с. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/19990/1/01-01-58%D0%9C.pdf>
12. Сільськогосподарські меліорації / [С.М. Гончаров, Г.С. Потоцький, В.С. Ковальов та ін.]; за ред. С.М. Гончарова, Г.С. Потоцького. – К. : Вища школа, 1991. 398 с.
13. Куковський А.Г., Кизима В.П. Технологія будівництва комплексу протиерозійних гідротехнічних споруд. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія Технічні науки. 2015. Випуск 3(71). С.198-204. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/5604/1/Vt71232%20%D0%B7%D0%B0%D1%85.pdf>

**Rusina N.G., Bida P.I., Petrova O.M., Kushniruk O.M., Bulakevych S.V. ON THE QUESTION OF THE DEVELOPMENT OF WORKING PROJECTS BY THE LAND INSTITUTE REGARDING THE PROTECTION OF LANDS AGAINST EROSION IN UKRAINE**

*The article presents the results of theoretical and experimental researches on the development of working land management projects for the protection of land from erosion, including a detailed description of scientific and methodological approaches to the development of the project, a description of the design stages of all components - the construction of water-retaining dykes-ditches and meadow reclamation measures, a description technologies of construction of anti-erosion hydrotechnical structures. It is mentioned that anti-erosion hydrotechnical structures are designed to combat soil erosion, waste water retention and are a component of the system of anti-erosion measures. The construction of such structures is carried out in accordance with the working land management project to protect land from erosion. The basic regulatory and legal documents are studied for scientific and methodological approaches to the development of a working draft of land management for the protection of land from erosion. It is established that the project should be carried out in two stages. The first stage involves a topographic survey of the territory at a scale of 1:1000 with a relief cross-section height of 0.5 m. The second stage is planning, or the stage of direct development of a working land management project. The article analyses the theoretical foundations of projecting anti-erosion hydraulic structures, namely a water retention berm-ditch as an earthen berm up to 2 m high, which is located across the slope and has a pond in front of it. The article presents the calculation of the parameters of a water retention shaft-ditch construction on the territory of the Mizoch territorial community of the Rivne district, Rivne region and the cross-sectional diagram of the water retention shaft and its components (spurs, bridges). The main calculation parameters include: catchment area, maximum water volume per 1 ha of catchment area, rampart height, groove volume, pond volume, water volume retained per linear meter of rampart, length of rampart, spurs and lintels, and the amount of earthworks and meadow reclamation measures. The two-tiered placement of the erosion control swale-ditch was determined in accordance with the tops of the ravine and the terrain. The construction technology of the ditch includes geodetic work on the main lines, removal of the vegetation layer from the elements of the ditch and its storage, installation work, planning of the ditch body, spurs and lintels, and sowing of grasses on the slopes.*

**Key words:** erosion, working draft of land management, disturbed lands, soil protection, fertile soil layer, marginal lands, documentation on land management, land management, management, land use.

## ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 612.315.592

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/22>

**Палагін В.А.**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

**Когдась М.Г.**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

**Ситнік В.Ю.**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

**Донських О.В.**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ СТРУКТУРИ ПОРУВАТОГО КРЕМНІЯ І МОДУЛЯ ЮНГА

*Стаття присвячена дослідженню взаємозв'язку між структурою поруватого кремнію та його механічними властивостями, зокрема модулем Юнга. У статті розкрито взаємозв'язок пружних параметрів поруватої кремнієвої матриці як функції поруватості з використанням моделювання методом скінченних елементів (МСЕ). Модель заснована на теорії пружності і враховує такі фактори, як розмір і розподіл пор, товщина стінок між порами та інші структурні характеристики. Кремнієва підкладка, з якої формується поруватий кремній, має кристалографічну орієнтацію (100), а пори мають циліндричну морфологію. Всього було розроблено шість форм пор з метою дослідження впливу морфології пор на пружні параметри. Форми були обрані відповідно до геометрії пор, отриманих методом електрохімічного травлення, і спроектовані як ортотропні структури. Розкрито, що морфологія пор має значний вплив на модулі пружності та визначено, що цьому фактору слід приділяти належну увагу в майбутніх дослідженнях. З'ясовано, що зі збільшенням поруватості пружні параметри ПК змінюються за певними закономірностями. Крім того, форма пор має значний вплив на ці закономірності, особливо для моделі з розгалуженими порами, але все ж таки існують деякі спрощення в моделюванні форми пор, тобто, згідно з результатами МСЕ для циліндричних і синусоїдальних пор, коли є лише невеликі зміни на стінці пори, її геометрична модель може бути спрощена у вигляді циліндра. Тоді як зміни стінки пори занадто великі, щоб їх можна було ігнорувати, як у випадку пори змінного радіусу, її можна розглядати, як дворадіусну модель; тим не менш, коли є відгалуження з боків від основної пори, їх не можна ігнорувати чи спрощувати. Отримані результати моделювання добре узгоджуються з експериментальними даними, наведеними в літературі для модуля Юнга. Крім того, запропоновано степеневі залежності модулів Юнга і модулів зсуву від поруватості та обговорено похибки цих залежностей.*

**Ключові слова:** поруватий кремній, травлення, коефіцієнт Пуассона, модуль Юнга.

**Постановка проблеми.** Поруватий кремній (ПК) утворюється шляхом електрохімічного травлення в розчині фтористоводневої кислоти. Цей матеріал останнім часом викликає все більший інтерес як з експериментальної, так і з теоретичної точки зору [1]. Загальноприйнята інтерпретація оптичних властивостей ПК базується на квантовому утриманні носіїв у нанокристалітах кремнію [2, 3, 5]. Однак, висока питома поверхня цього

поруватого матеріалу – від 200 до 600 м<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>, як показали адсорбційні вимірювання [6] також відіграє ключову роль [7]. Варто також зазначити, що ефективна люмінесценція ПК спостерігалася лише на високопоруватих шарах – поруватість яких понад 70%.

Оптичні, електричні та теплові властивості PSi широко вивчалися [7, 8] через їх численні сфери застосування. На відміну від цього, дуже мало

досліджень стосувалося механічних властивостей ПК. Лише зовсім недавно було виміряно модуль Юнга ПК за допомогою акустичних методів [9] в діапазоні низької поруватості – до 47%. Тим не менш, пружні властивості поркаптих кремнієвих шарів – особливо з високою поруватістю, є важливими параметрами. Насправді механічна нестабільність ПК є серйозною проблемою для розробки пристроїв, пов'язаних з ПК. Наприклад, розтріскування високопоруватих кремнієвих шарів спостерігається, коли капілярні напруження занадто великі під час випаровування електроліту [10]. Таким чином, щоб зрозуміти явище розтріскування, необхідно знати пружні властивості кремнієвих матеріалів [11] оскільки вони визначають пружно накопичену енергію у відповідь на капілярні напруження.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Модуль Юнга безпосередньо пов'язаний з константою ґратки і, таким чином, з морфологією пор. Автор [12, 13] використовував акустичну мікроскопію для дослідження акустичних властивостей ПК, виготовленого з кристалічної кремнієвої пластини р+-типу (100). Він описав швидкості поздовжніх і поперечних хвиль,  $V_L$  і  $V_S$ , як емпіричні функції поруватості, де підрядковий індекс "0" позначає швидкість у кристалічному кремнії, а  $n$  – параметр, що залежить від форми пор. Вимірювання показали хороше узгодження з теорією за формулами [14, 15]. Виходячи з цього припущення, автори [16] вивчили механічні властивості спеченого мезопоруватого кремнію за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ). Таким чином, вони змоделювали ПК з використанням випадково розподілених сферичних пор і дійшли висновку, що властивості спеченого ПК добре узгоджуються з експериментом. В роботі [5] автори застосували метод наноінденування для дослідження модуля Юнга PSi з поруватістю від 36% до 90% і показали, що рівень легування впливає на модуль Юнга ПК. Крім того, вони вказали, що основна відмінність між р+ і р-типом ПК полягає в морфології пор. Приймаючи коефіцієнт Пуассона ПК за константу ( $\nu_p = 0,10$ ), Беллет дійшов висновку, що модуль Юнга ПК р+ типу (100), відповідає степеневій функції:

$$E_p = A(1 - \phi)^2$$

де  $A = 120$  ГПа. Використовуючи підхід дискретної гомогенізації, [17] розглядали PSi як кубічний матеріал і отримали функцію, подібну до функції [5]. Автори [18, 21] запропонували нову функцію для модуля Юнга як:

$$E_p = E_0 (1 - \phi)^2,$$

де  $E_0$  – модуль Юнга кристалічного кремнію.

**Постановка завдання.** У наведених вище роботах дано пояснення мікроскопічної механіки пружних параметрів ПК, і всі вони згадують, що структура пор є одним з ключових факторів для оцінки пружних властивостей ПК, але їхні дискусії обмежуються припущеннями, такими як постійний коефіцієнт Пуассона, і не згадують про анізотропні властивості ПК. Тому необхідно детально дослідити анізотропні властивості ПК. З цією метою пропонується дослідити вплив на його пружні властивості поправок на порову структуру. Враховуючи, що вплив цих факторів не можна легко вивчити або кількісно оцінити за допомогою експерименту, в цій статті пропонується моделювання за допомогою МСЕ.

**Виклад основного матеріалу.** Мікроскопічний аналіз пружної хвилі, що поширюється в твердому тілі, починається з визначення залежності між напруженням і деформацією. Закон Гука формулює цю залежність як:

$$\sigma = C e \quad (1)$$

де  $\sigma$  – тензор напружень (стиснення або розтягнення), прикладених до даного середовища, а  $e$  – результуючий тензор деформації;  $C$  – тензор жорсткості. У випадку кристалів тензори  $\sigma$  та  $e$  мають порядок два, тоді як  $C$  є тензором четвертого порядку. Кількість незалежних компонент у  $C$  залежить від симетрії кристала (до 21 для триклінної). Для ортотропної структури, яка має три взаємно ортогональні подвійні осі симетрії, тензор жорсткості має дев'ять незалежних параметрів, які в матричній формі можна записати як:

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

У випадку матеріалу з кубічною симетрією, такого як кристалічний кремній, тільки 3 компоненти є незалежними в його  $C$  ( $c_{12} = c_{13} = c_{23}$ ,  $c_{11} = c_{22} = c_{33}$ ,  $c_{44} = c_{55} = c_{66}$ ). Використовуючи формули (1) і (2), пружні параметри кристалічного кремнію можуть бути виведені з його тензора жорсткості [2] як:

$$E = \frac{1}{2} \frac{(c_{11} - c_{12})(c_{11} + 2c_{12})}{c_{11} + c_{12}}$$

$$\nu_0 = \frac{c_{12}}{c_{11} + c_{12}}$$

$$G_0 = c_{44} \quad (3)$$

$$K_0 = \frac{c_{11} + 2c_{12}}{3}$$

де  $E_0$  – модуль Юнга,  $\nu_0$  – коефіцієнт Пуассона,  $G_0$  – модуль зсуву і  $K_0$  – модуль об'ємної пружності. Оскільки це ортотропний матеріал, його пружні параметри змінюються в різних напрямках. Тому, для уточнення, підрядковий індекс "0" означає основний напрямок об'ємної маси, без пор всередині.

Закон Гука також можна переписати як залежність напруження від деформації:

$$e = S \cdot \sigma \quad (4)$$

де  $S$  – тензор податливості, який дорівнює оберненій величині до тензора жорсткості  $C$ .

Ця залежність корисна для оцінки пружних параметрів ортотропного середовища, оскільки вона безпосередньо пов'язана з модулем Юнга  $E_i$ , модулем зсуву  $G_j$  та коефіцієнтом Пуассона  $\nu_{ij}$  в кожному напрямку, як показано у формулі (5). Тут координати встановлені паралельно основним напрямкам кристала кремнію, тобто вісь  $x$  співпадає з  $[100]$ , вісь  $y$  – з  $[010]$ , а  $z$  з  $[001]$

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{zx}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Видно, що ці параметри пружності пов'язують напруження з результуючою деформацією. Як наслідок, пружні параметри можна отримати, прикладаючи різні види напружень і спостерігаючи за деформаціями, що виникають при цьому. Наприклад, прикладаючи нормальне напруження (розтягнення або стиснення)  $\sigma_i$  до  $i_k$  – поверхні поруватого середовища, а бічні поверхні залишаються вільними, з формули (5) отримуємо співвідношення  $e_i = \sigma_i / E_i$ ,  $e_j = -(\sigma_i \nu_{ij}) / E_i$ ,  $e_k = -(\sigma_i \nu_{ik}) / E_i$ . Перетворюючи ці співвідношення, визначаємо параметри пружності:

$$\begin{aligned} E_i &= \frac{\sigma_i}{e_i} \\ \nu_{ij} &= -\frac{e_j}{e_i} \\ G_{ij} &= \frac{\tau_{ij}}{\gamma_{ij}} \end{aligned} \quad (6)$$

Враховуючи осьову симетрію пор, маємо також наступні співвідношення:  $E_y = E_z$ ;  $\nu_{xy} = \nu_{xz}$ ;  $\nu_{yx} = \nu_{zx}$ ;  $\nu_{yz} = \nu_{zy}$ , таким чином кількість незалежних пружних параметрів для ортотропного матеріалу зменшується.

Прикладаючи статичний тиск на поверхню середовища, тобто  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = p$ , і напруження зсуву  $\tau_x = \tau_y = \tau_z = 0$ , тоді

$$e_x = \left(\frac{1}{E_x} - \frac{\nu_{yx}}{E_y} - \frac{\nu_{zx}}{E_z}\right)p, e_y = \left(\frac{1}{E_y} - \frac{\nu_{xy}}{E_x} - \frac{\nu_{zy}}{E_z}\right)p, e_z = \left(\frac{1}{E_z} - \frac{\nu_{xz}}{E_x} - \frac{\nu_{yz}}{E_y}\right)p$$

Нарешті, об'ємний модуль для ПК  $K_b$  виводиться за співвідношенням:

$$K_b = \frac{p}{e_x + e_y + e_z} \quad (7)$$

що означає, що модуль об'ємної пружності обчислюється за допомогою гідростатичного тиску, поділеного на результуючий декремент об'єму. Згідно з формулами (6) і (7), для обчислення пружних параметрів зручно використовувати симуляції МСЕ.

Згідно з морфологічними характеристиками ПК, розглядається як ортотропний поруватий матеріал. Вважається, що ПК витравлюється з (100) орієнтованої кремнієвої пластини, а геометрична модель, яка використовується для моделювання – з прямими і періодично розподіленими порами, орієнтованими вздовж координати  $x$ . Значення констант жорсткості (незалежні компоненти  $C$ ) для орієнтованого  $[100]$  кристала чистого кремнію наведено в табл. 1 [2].

Таблиця 1

Значення констант жорсткості (в ГПа) для кремнію при кімнатній температурі

$c_{11}$	$c_{12}$	$c_{44}$
165,6	63,9	79,5

Використовуючи формулу (3) і значення в табл. 1, відповідні пружні параметри для об'ємного кремнію розраховуються і подаються в табл. 2.

Таблиця 2

Значення пружних параметрів для об'ємного кремнію при кімнатній температурі

$E_0$	$\nu_0$	$G_0$	$K_0$
130Гпа	0,28	79,5Гпа	97,8ГПа

Для того, щоб зменшити обчислювальні витрати, пори задаються рівномірними та осесиметричними, таким чином, кубічний зразок з однією порою в середині є достатньо хорошим для того, щоб бути репрезентативним об'ємним елементом (РОЕ). Просторовий період кубічного

РОЕ встановлюється як  $a = 25 \text{ нм}$ , як показано на рис. 1. Варто зазначити, що цей просторовий період не впливає на результати моделювання пружних параметрів, і він визначений тут лише для розрахунків МСЕ. Внутрішня частина пори є порожньою, тобто без будь-яких рідин або частинок. Решта твердої частини, або скелет, куба складається з чистого кремнію.

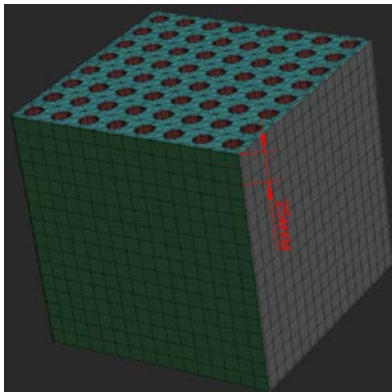


Рис. 1. РОЕ зразка PSi з циліндричними порами, параметр  $a$  – просторовий період

Завдяки симетриям задаються періодичні граничні умови для подальшого зменшення обчислень. На рис. 2 показано приклад набору граничних умов для моделювання за модулем Юнга вздовж осі  $x$ , де на  $yz$ -поверхню МСЕ навантажено розтягуюче напруження, паралельне до напрямку  $x$ . Після обчислення МСЕ отримано вектор переміщень  $u = (u, v, w)$  та тензор деформацій  $e_{PE}$ . Таким чином, на основі формули (6) можна отримати  $E_p$ ,  $\nu_{ji}$  та  $G_{ji}$ . Відповідно до співвідношення «напруження-деформація» (5) обчислюються компоненти тензора податливості ПК ( $s_{ij}$ ), а також тензор жорсткості  $C$  (шляхом інвертування  $S$ ).

Насправді, пори в ПК не завжди такі ж ідеальні, як циліндри і мають різну морфологію залежно від умов травлення і властивостей підкладки, таких як тип і рівень легування, кристалічна орієнтація і т.п. Було показано, що пори, витравлені при низькій густині струму, як правило, мають нижчу поруватість і мають розгалужену морфологію [19], як на рис. 3(а) [20, 21]. Навпаки, висока густина струму зазвичай призводить до утворення більших пор з циліндричною морфологією, як на рис. 3(б).

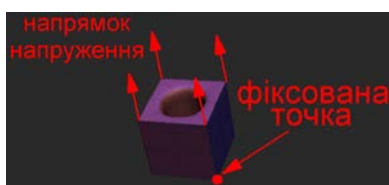


Рис. 2. Опис граничних умов для обчислення модуля Юнга  $E_x$

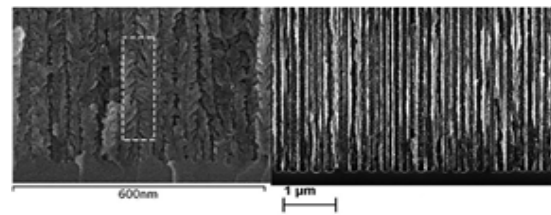


Рис. 3. Поперечні перерізи типових форм пор на SEM зображенні (а) з розгалуженою морфологією, (б) з більшими та циліндричними порами

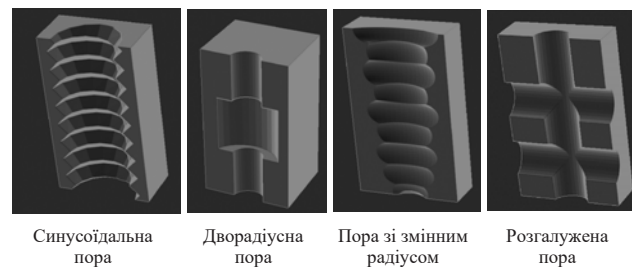


Рис. 4. Різні морфологічні моделі, реалізовані в симуляції МСЕ

Відповідно до результатів роботи [22], для розширення діапазону дослідження та отримання достовірних результатів будуть досліджуватись різні види морфології пор. По-перше, на додаток до циліндричної пори на рис. 1, було спроектовано чотири інші типові форми пор (показані на рис. 4 відповідно до досяжної морфології ПК, і вони відповідно названі: циліндрична, синусоїдальна, дворадіусна, змінно-радіусна і розгалужена моделі. Зокрема, синусоїдальна модель демонструє невеликі варіації радіусів пор, а форма стінки не змінюється зі збільшенням розміру пор; дворадіусна модель має два різні радіуси пор у співвідношенні 1:2; змінно-радіусна модель має велику варіацію радіусів на стінці пор і ця варіація збільшується зі збільшенням розміру пор; розгалужена модель має кілька бічних відгалужень, симетрично розподілених уздовж основної циліндричної пори. Множинна поруватість отримується шляхом зміни розміру пор. Використовуючи ці морфологічні моделі, можна вивчати вплив форми пор на пружні параметри. Варто зазначити, що обчислені результати для пружних параметрів тут є фактично для МСЕ, тому вони розглядаються як ефективні значення для ПК, який є пружним матеріалом.

Крім того, враховуючи морфологію пор, наведену на рис. 4, поруватість обмежена до 63%. Для досягнення більшої поруватості пропонується гібридна модель з вторинними порами та відгалуженнями. Спроекований приклад на рис. 5 розрахований на поруватість 60%. Він близький до розгалуженої моделі при меншій поруватості, тоді як зі збільшенням поруватості він стає більш схожим на комбінацію циліндрів з різними радіусами. Поруватість цієї моделі може досягати 89%.

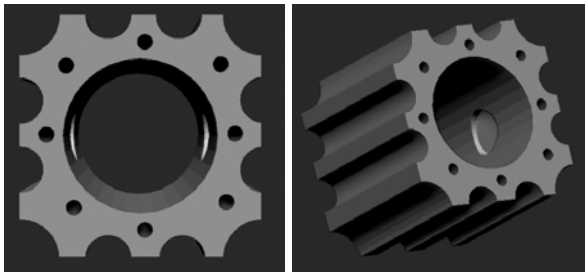


Рис. 5. Гібридна модель (одна головна циліндрична пора з бічними відгалуженнями та вторинними порами)

Результати моделювання представлені, шляхом порівняння з літературними даними, щоб показати їхню достовірність. Шляхом побудови графіків модулів пружності та підбору їх як степеневих законів поруватості, представлено та проаналізовано відмінності в модулях пружності між шістьма моделями.

Результати моделювання за допомогою МСЕ модуля Юнга, об'ємного модуля та модуля зсуву представлені відповідно на рис. 6–8. Таким чином, вплив форми пор та поруватості на пружні властивості ПК можна спостерігати за варіаціями та розбіжностями.

З рис. 6–8 видно, що зміна пружних модулів, як функції поруватості чітко залежить від геометрії пор.

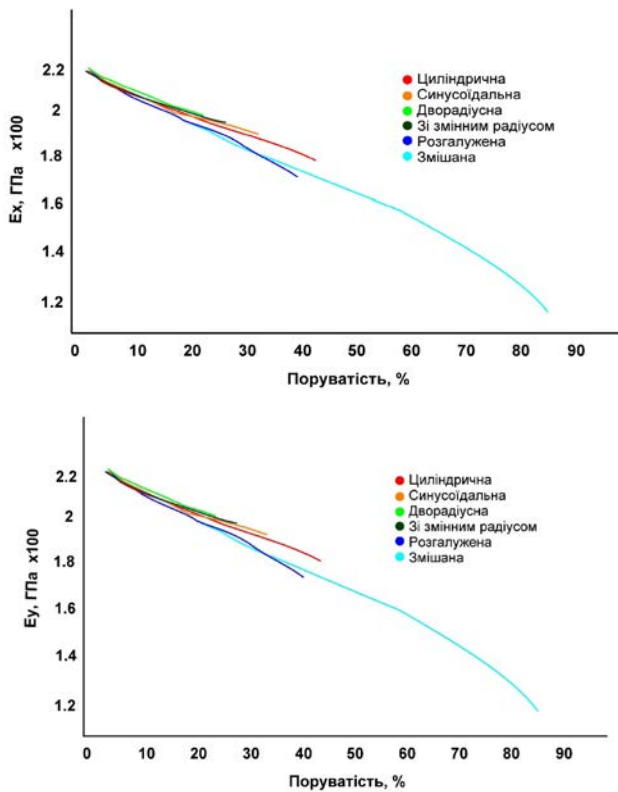


Рис. 6. Залежність модуля Юнга ПК від поруватості з різною формою пор (через симетрію геометричних моделей  $E_z$  тотожний  $E_y$ )

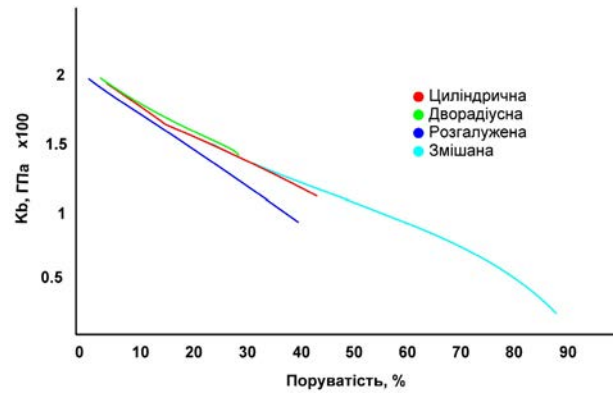


Рис. 7. Залежність модуля об'ємної маси від поруватості з різною формою пор

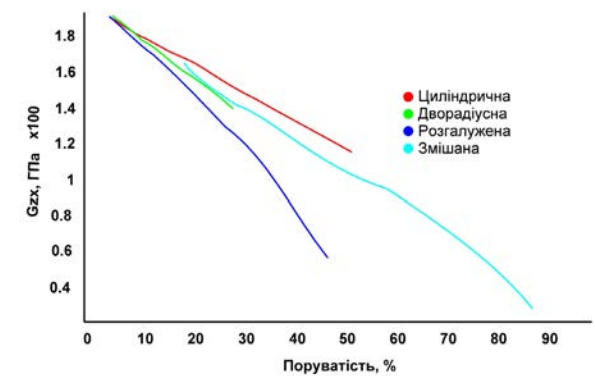
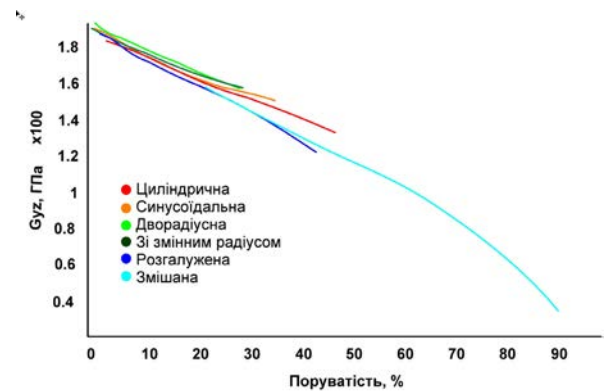
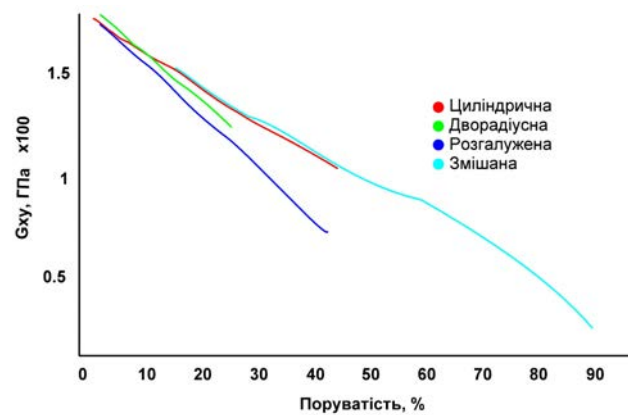


Рис. 8. Залежність модуля зсуву від поруватості з різною формою пор

Вплив форми пор є різним для кожного модуля пружності, спостерігається деяка схожість між цими моделями пор. Наприклад, пружні параметри циліндричної та синусоїдальної геометрії приблизно однакові, так само як і дворадіусної та змінного радіусу. Це пояснюється тим, що радіус пор не сильно змінюється між синусоїдальною і циліндричною геометрією, тоді як дворадіусні пори і геометрія зі змінним радіусом мають величезні варіації радіусу в напрямку осі  $x$ . Тому синусоїдальні моделі та моделі зі змінним радіусом не показані на рис. 7 і 8. Тим не менш, модуль об'ємної маси дуже схожий для всіх геометрій, окрім розгалуженої. Невеликі зміни на стінці пори є незначними, але розгалуження суттєво впливають на всі пружні параметри ПК.

Функції підбору модуля Юнга  $E$  та модуля зсуву  $G$  ПК були запропоновані [16] як степеневий закон поруватості, що визначається за допомогою:

$$\begin{aligned} E &= E_0'(1 - \phi)^m \\ G &= G_0'(1 - \phi)^h \end{aligned} \quad (8)$$

де  $E_0'$  і  $G_0'$  – масштабні коефіцієнти, які зазвичай дорівнюють відповідно модулю Юнга і модулю зсуву кристалічного кремнію (представлені в рівнянні (3) і таблиці 2).  $m$  і  $h$  – числа підбору.

Таблиця 3

### Підбір параметрів степеневого закону для модулів Юнга та зсуву

Форма	m		h		
	$E_x$	$E_y$	$G_{xy}$	$G_{yz}$	$G_{zx}$
Циліндрична	1	1,57	1,75	3,9	1,65
Синусоїдальна	1,04	1,63	1,85	3,8	1,75
Дворадіусна	1,45	1,67	2,25	3,35	2,15
Зі змінним радіусом	1,4	1,65	2,25	3,4	2,13
Розгалужена	1,15	2,,1	2,68	3,75	3,1
Змішана	0,98	2,05	1,56	3,05	1,5

Використовуючи ці формули,  $m$  і  $h$  були підібрані з числових значень пружних параметрів. Вони наведені в табл. 3 для модулів Юнга та модулів зсуву. Похибки підбору  $err_i$  також розраховані на основі формули (9), щоб показати точність підбору, де  $y_i$  – змодельований результат,  $y_i'$  – результат підбору і  $i$  означає позицію даних.  $err_i$  представлені у вигляді стовпчиків похибок на рис. 6–8, з яких видно, що підбір за степеневим законом добре узгоджується з змодельованими результатами при меншій поруватості для циліндричної моделі, моделі з двома радіусами і розгалуженої моделі, але похибка стає вищою при

більшій поруватості, як і у випадку з гібридною моделлю. Таким чином, для цього діапазону поруватості фітинги є недостатньо надійними. Крім того, слід зазначити, що масштабні коефіцієнти тут дещо відрізняються від  $E_0$  або  $G_0$  в табл. 2. Степеневі залежності є лише приблизними оцінками зв'язку між модулями пружності та поруватістю.

$$Err_i = y_i y_i' \quad (9)$$

Значення чисел припасування  $m$  і  $h$  для перших п'яти моделей форми (від циліндричної до розгалуженої) близькі до значень, наведених в [16], за винятком  $G_{yz}$ . Розбіжність пояснюється відмінностями моделей, а також тим, що коефіцієнт Пуассона ПК в роботі [16] розглядався як константа. Як показано, коефіцієнт Пуассона змінюється не тільки з поруватістю, але й з формою та орієнтацією пор. Також можна помітити, що значення для циліндричних і синусоїдальних моделей близькі, тоді як для моделей з двома радіусами і модель зі змінним радіусом близькі. Таким чином, їх можна згрупувати у дві родини.

**Висновки.** Отримала подальший розвиток математичну модель визначення пружних параметрів у поруватому кремнії, що дозволяє визначити механічних властивостей цього матеріалу. Модель здатна враховувати складну порувату структуру кремнію, що дозволяє з більшою точністю визначати модуль Юнга та інші механічні характеристики враховуючи мікроструктурні особливості матеріалу, такі як форма, розмір і розподіл пор. Це дозволяє прогнозувати поведінку матеріалу під навантаженням з набагато вищою точністю, ніж це було можливо раніше. Крім того, модель інтегрує анізотропні властивості поруватого кремнію, що робить її особливо корисною для застосувань, де матеріал піддається складним механічним впливам.

Досліджено вплив форми пор на пружні параметри при різній поруватості на прикладі кількох типових морфологічних моделей ПК. Результати були отримані за допомогою методу скінченних елементів. З аналізу результатів і порівняння з експериментальних даних з літературними можна зробити висновок, що зі збільшенням поруватості пружні параметри ПК зменшуються за певними закономірностями. Крім того, форма пор має значний вплив на ці закономірності, особливо для моделі з розгалуженими порами, але все ж таки існують деякі спрощення в моделюванні форми пор, тобто, згідно з результатами МСЕ для циліндричних і синусоїдальних пор, коли є лише невеликі зміни на стінці пори, її геометрична модель

може бути спрощена у вигляді циліндра. Тоді як зміни стінки пори занадто великі, щоб їх можна було ігнорувати, як у випадку пори змінного радіусу, її можна розглядати, як дворадіусну модель; тим не менш, коли є відгалуження з боків від основної пори, їх не можна ігнорувати чи спрощувати.

Визначено, що коефіцієнт Пуассона залежить не тільки від поруватості, але й від форми та напрямку пор. Також видно, що значення циліндричної та синусоїдальної моделей близькі, так само як і значення дворадіусної моделі та моделі зі змінним радіусом.

#### Список літератури:

1. R. Herins, W. Lang, and H. Münder Porous silicon: Material, Technology and Devices. *Proc. E-MRS Spring Conference North Holland, Amsterdam*, 1996. 344p.
2. Aliev, G.N., Goller, B., Snow, P.A., Elastic properties of porous silicon studied by acoustic transmission spectroscopy. *J. Appl. Phys.* 2011. 110 (4), P. 1–8. doi: 10.1063/1.3626790.
3. Anglin, E.J., Cheng, L., Freeman, W.R., Sailor, M.J., Porous silicon in drug delivery devices and materials. *Adv. Drug Deliv. Rev.* 2008. 60 (11), P. 1266–1277. doi: 10.1016/j.addr.2008.03.017.
4. O. Belmont; D. Bellet; Y. Bréchet. Study of the cracking of highly porous p+ type silicon during drying. *J. Appl. Phys.* 1996. 79, P. 7586–7591. doi: 10.1063/1.362415.
5. Bellet, D., Lamagnère, P., Vincent, A., Bréchet, Y., 1996. Nanoindentation investigation of the Young's modulus of porous silicon. *J. Appl. Phys.* 80 (7), 3772–3776. doi: 10.1063/1.363305 .
6. Biot, M.A., Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. i. low frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.* 1956. 28 (2), P. 168–178. doi: 10.1121/1.1908239.
7. Aouassa, M., Hassayoun, L., Favre, L., Ronda, A., Berbezier, I., Optimization of structural and optical properties of nanoporous silicon substrate for thin layer transfer application. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* 2019. 30 (3), P. 2585–2591. doi: 10.1007/s10854-018-0533-8.
8. Canham, L., 2014. Handbook of Porous Silicon, *Springer*. 2018. 1613p. doi: 10.1007/978-3-319-71381-6.
9. Lu, Z., Liu, N., Lee, H.W., Zhao, J., Li, W., Li, Y., Cui, Y., Nonfilling carbon coating of porous silicon micrometer-sized particles for high-performance lithium battery anodes. *ACS Nano.* 2015. 9 (3), P. 2540–2547. doi: 10.1021/nn505410q.
10. Gautier, G., Kouassi, S., Integration of porous silicon in microfuel cells: a review. *Int. J. Energy Res.* 2015. 39 (1), P. 1–25. doi: 10.1002/er.3206.
11. Bustillo, J., Fortineau, J., Gautier, G., Lethiecq, M., Ultrasonic characterization of electrochemically etched porous silicon. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2014. 53 (6), 1–4. doi: 10.7567/JJAP.53.060308 .
12. Da Fonseca, R.J.M., Saurel, J.M., Despau, G., Elastic characterization of porous silicon by acoustic microscopy. *Superlattices Microstruct.* 1994. Vol. 16, Iss. 1. P. 21–23. doi: 10.1006/spmi.1994.1102.
13. RR. J. M. Da Fonseca, J. M. Saurel, A. Foucaran, J. Camassel, E. Massone, T. Taliércio & Y. Boumaiza. Acoustic investigation of porous silicon layers. *Journal of Materials Science.* 1995. Volume 30. P. 35–39. doi: 10.1007/BF00352128.
14. Bustillo, J., Fortineau, J., Gautier, G., Lethiecq, M., Ultrasonic characterization of porous silicon using a genetic algorithm to solve the inverse problem. *NDTE.* 2014. Int. 62, P. 93–98. doi: 10.1016/j.ndteint.2013.11.007.
15. Da Fonseca, R.J.M., Saurel, J.M., Despau, G., Elastic characterization of porous silicon by acoustic microscopy. *Superlattices Microstruct.* 1994. P. 21–23. doi: 10.1006/spmi.1994.1102.
16. Martini, R., Depauw, V., Gonzalez, M., Vanstreels, K., Nieuwenhuysen, K.V., Gordon, I., Poortmans, J., Mechanical properties of sintered meso-porous silicon: a numerical model. *Nanoscale Res. Lett.* 2012. 7 (1), 597p. doi: 10.1186/1556-276X-7-597 .
17. Magoaric, H., Danescu, A. Modeling macroscopic elasticity of porous silicon. *Physica Status Solidi (C) Current Topics in Solid State Physics.* 2009. Vol. 6 (7), P. 1680–1684. doi: 10.1002/pssc.200881053 .
18. Populaire, C., Remaki, B., Lysenko, V.I., Barbier, D., Artmann, H., Pannek, T.L., On mechanical properties of nanostructured meso-porous silicon. *Appl. Phys. Lett.* 2003. 83 (7), P. 1370–1372. doi: 10.1063/1.1603336 .
19. Korotchenkov, G.S., Porous Silicon : From Formation to Application. Volume one. Formation and Properties. CRC Press. 2015. 439p. doi: 10.1201/b19342.
20. Melhem, A., De Sousa Meneses, D., Andreaza-Vignolles, C., Defforge, T., Gautier, G., Semmar, N. Structural, optical, and thermal analysis of n-type meso-porous silicon prepared by electrochemical etching. *J. Phys. Chem. C.* 2015. 119 (37), P. 21443–21451. doi: 10.1021/acs.jpcc.5b04984 .
21. Xiaoyue Gong, Julien Bustillo, Laurianne Blanc, Gaël Gautier FEM simulation on elastic parameters of porous silicon with different pore shapes. *International Journal of Solids and Structures.* 2020. Vol. 190. P. 238–243. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2019.11.001.
22. Foll H., Christophersen M., Carstensen J., Hasse G., Formation and application of porous silicon. *Materials Science and Engineering R.* 2002. Vol. 39. P. 93–141. doi: 10.1016/S0927-796X(02)00090-6.



**Palahin V.A., Kogdas M.H., Sytnik V.Yu., Donskih O.V. A MATHEMATICAL MODEL IS PRESENTED WHICH ELUCIDATES THE RELATIONSHIP BETWEEN THE STRUCTURE OF POROUS SILICON AND THE YOUNG'S MODULUS**

*This article is dedicated to the examination of the correlation between the structural characteristics of porous silicon and its mechanical properties, with a particular focus on Young's modulus. The article elucidates the relationship between the elastic parameters of a porous silicon matrix as a function of porosity through the utilisation of finite element modelling (FEM). The model is founded upon the principles of elasticity and considers a range of factors, including pore size and distribution, wall thickness between pores, and other structural characteristics. The silicon substrate from which the porous silicon is formed exhibits a crystallographic orientation (100), and the pores display a cylindrical morphology. A total of six pore shapes were developed for the purpose of studying the effect of pore morphology on elastic parameters. The shapes were selected in accordance with the geometry of the pores obtained by electrochemical etching and designed as orthotropic structures. The results demonstrate that pore morphology has a significant impact on the elastic moduli. Consequently, this factor should be given due attention in future studies. It was observed that as porosity increased, the elastic parameters of PC exhibited a decline in accordance with specific patterns. Furthermore, the pore shape exerts a considerable influence on these patterns, particularly in the case of the model with branched pores. However, there are still some simplifications inherent to the modelling of the pore shape. For instance, according to the FEM results for cylindrical and sinusoidal pores, when there are only minor alterations to the pore wall, its geometric model can be simplified as a cylinder. While the pore wall changes are significant and cannot be ignored, as in the case of a variable radius pore, it can be treated as a two-radius model. However, when there are branches on the sides of the main pore, they cannot be ignored or simplified. The simulation results are in good agreement with the experimental data reported in the literature for the Young's modulus. Furthermore, power-law dependences of the Young's and shear moduli on the porosity are proposed, and the associated errors are discussed.*

**Key words:** porous silicon, etching, Poisson's ratio, Young's modulus.

**Терещенко Т.О.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Ямненко Ю.С.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Кущинський Є.О.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Ємець О.О.**

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ПОРІВНЯННЯ АЛГОРИТМІВ СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ НА БАЗІ ВЕЙВЛЕТІВ

У статті розглядаються сучасні вимоги до систем обробки відеозображень, що використовуються у безпілотних літальних апаратах (БПЛА). Показано перспективи застосування алгоритмів стиснення зображень у БПЛА, де велике значення має ефективне використання ресурсів і каналів передачі даних. З розвитком мікроелектронних та інформаційно-комунікаційних технологій БПЛА стали важливим інструментом у різних галузях, зокрема військовій справі, аграрному секторі, дослідницькій діяльності, і навіть у сфері розваг. Тому алгоритми стиснення, що дозволяють зберегти важливі деталі зображень при мінімальному розмірі файлів, відіграють важливу роль у підвищенні ефективності таких систем.

У статті проаналізовано різні алгоритми стиснення зображень і відео на основі вейвлетів, зокрема неперервні вейвлети Добеші 4-го та 8-го порядків, дискретні вейвлети Хаара та перетворення в орієнтованому базисі (ОБ). Кожен із цих алгоритмів має свої переваги та недоліки, що робить їх оптимальними для різних типів зображень і умов застосування. Наприклад, вейвлети Добеші мають високу ефективність для складних сигналів із високочастотними змінами, що дозволяє зберегти більш точну картину при стисненні складних зображень або відео.

Стиснення зображень за допомогою вейвлет-перетворень є ефективним методом, що зменшує розмір файлів при збереженні важливих деталей. Вейвлети Добеші належать до класу неперервних вейвлетів. У статті розглянуто два типи з родини вейвлетів Добеші – вейвлети 4-го і 8-го порядків, які мають відповідно чотири та вісім нульових моментів. Вейвлет 4-го порядку дозволяє краще аналізувати сигнали з незначними змінами, тоді як вейвлет 8-го порядку є ефективнішим для аналізу складних сигналів із високою частотою змін, що особливо важливо для аналізу динамічних сцен у відеозаписах.

Дискретні вейвлети на основі перетворення Хаара та ОБ-методів також мають свої переваги при обробці зображень із локальними деталями, такими як краї та текстури. Хоча метод Хаара є простим у реалізації та швидким, його використання може призвести до деякої втрати якості зображень. ОБ-метод дозволяє глибше аналізувати структуру зображень, однак вимагає більшої обчислювальної потужності. Моделювання, проведене в рамках статті, показує, що методи Хаара та ОБ зменшують розмір файлів, але це відбувається за рахунок втрати частини якості зображення.

З огляду на всі переваги та недоліки, вибір методу стиснення залежить від конкретної задачі та вимог до якості результату.

**Ключові слова:** обробка відео, безпілотні літальні апарати, алгоритми стиснення зображень, дискретні та неперервні вейвлет-перетворення, вейвлети Добеші, перетворення Хаара, перетворення в орієнтованому базисі.

**Постановка проблеми.** На сьогодні безпілотні літальні апарати (БПЛА) застосовується в багатьох сферах діяльності, зокрема, у дронах на полі бою [1, с. 34–39]. Однією з ключових функцій БПЛА є збір та обробка даних з бортових камер [2, с. 1–41]. Сучасні розробки в цій області дозволяють збирати більше інформації та передавати її в режимі реального часу, що покращує безпеку польоту та інформованість про поточну ситуацію. Нові алгоритми дозволяють зменшити час обробки та підвищити якість інформації. Так, стиснення зображень дозволяє ефективно зменшувати розмір файлів, зберігаючи при цьому значущі деталі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теоретичні аспекти обробки зображень та відео були досліджені вітчизняними та зарубіжними науковцями, серед яких Йосип Білинський (Україна) [3, с. 1–5], Бернад Склар (США), Інgrid Добеші (Бельгія) [4, с. 1–5], Стефан Жорж Малла (Франція) [5, с. 674–693]. Порівняльна характеристика відомих методів стиснення наведена у табл. 1. У першій колонці табл. 1 показано, наскільки зменшується розмір даних. Друга колонка описує симетричність за часом. Значення 1 в цій колонці означає симетричність, тобто однаковий час стиснення та розпакування, або відновлення даних;  $>1$  – стиснення відбувається швидше, ніж розпакування;  $<1$  – розпакування відбувається швидше, ніж стиснення. Третя колонка вказує, на що орієнтований алгоритм (наприклад, обробка текстів, зображень, аудіо). У четвертій колонці зазначено, чи відбувається втрати інформації при стисненні (методи із втратами видаляють частину інформації для зменшення розміру зображення, що призводить до зниження якості; методи без втрат забезпечують відновлення зображення ідентично оригіналу, однак зазвичай забезпечують менший ступінь стиснення). П'ята колонка вказує, чи підходить алгоритм для одновимірних

даних (1D – текст, часові ряди) або двовимірних (2D – зображення) даних.

Серед існуючих методів, які працюють із зображеннями та відео, вейвлет-перетворення мають переваги: вони здатні ефективно обробляти зображення, що містить такі локальні деталі, як краї та текстури, і можуть адаптуватися до різних типів даних. Тому в даній статті буде зосереджено увагу на використанні саме вейвлет-перетворень для розв'язання задачі аналізу та стиснення медіаданих.

**Постановка завдання.** Метою статті є порівняння методів стиснення зображень і відео з безпілотних літальних апаратів на базі різних типів вейвлет-перетворень та вибір кращого та ефективного з них з точки зору якості стиснення, точності відновлення оригінальних даних та швидкодії [6, с. 23–27; 7 с. 26–38], що є важливим для передачі по каналам зв'язку з відносно низькою пропускною здатністю без суттєвих втрат якості інформації.

**Виклад основного матеріалу.** Вейвлет-аналіз заснований на розкладанні досліджуваної функції в ряд вейвлет-функцій, які локалізовані в часі та мають різний спектральний склад. Завдяки зміні масштабів вейвлети здатні виявити відмінності на різних частотах, а завдяки зсувам масштабованих версій сигналу вздовж часової вісі проаналізувати властивості сигналу в різних точках по всьому інтервалі, що вивчається. Тому вейвлети широко застосовують для аналізу нестационарних процесів.

У даній роботі будуть розглянуті вейвлет-перетворення, які оперують з дійсними числами. Різні модифікації вейвлет-аналізу використовуються в цифровій обробці сигналів та зображень, наприклад, для стиснення даних, адаптивної фільтрації, кодування, розпізнавання образів.

Вейвлети Добеші належать до класу неперервних вейвлетів, але мають свої дискретні модифікації [4, с. 1–5].

Таблиця 1

Порівняльна характеристика методів стиснення даних

Алгоритм	Коефіцієнт стиснення	Симетричність за часом	На що орієнтований	Втрати	Розмірність
RLE	32, 2, 0.5	1	3,4-х бітні	Немає	1D
LZW	1000, 4, 5/7	1.2-3	1-8 бітні	Немає	1D
Хаффмана	8, 1.5, 1	1-1.5	8 бітними	Немає	1D
СІТТ-3	213(3), 5, 0.25	~1	1-бітні	Немає	1D
JBIG	2-30 разів	~1	1-бітні	Немає	2D
Lossless JPEG	2 рази	~1	24-бітові, сірі	Немає	2D
JPEG	2-20 разів	~1	24-бітові, сірі	Є	2D
Вейвлет-перетворення	2-200 разів	1.5	24-бітові, сірі	Є	2D
Фрактальний	2-2000 разів	1000-10000	24-бітові, сірі	Є	2.5D

В основі побудови вейвлетів Добеші лежать рівняння масштабування та материнський вейвлет:

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_k \varphi(2t - k) \quad (1)$$

$$\psi(t) = \sqrt{2} \sum_k g_k \varphi(2t - k) \quad (2)$$

Рівняння (1) описує застосування фільтрації низьких частот (ФНЧ) сигналу  $f(x)$ , рівняння (2) – фільтрацію високих частот (ФВЧ).

Вейвлети будуються таким чином, щоби забезпечити максимальну кількістю зникаючих моментів. Значення моменту  $M$  визначає кількість коефіцієнтів  $h_k$  в рівнянні (1) і довжину області завдання вейвлетів.

Розглянемо побудову вейвлетів Добеші 4 порядку. Із властивості ортогональності функцій  $\varphi(x)$  отримаємо рівняння, що пов'язує коефіцієнти

$$h_1 h_2 + h_1 h_3 = 0, \quad (3)$$

Із властивості ортогональності вейвлета поліномам отримуємо два рівняння

$$\begin{aligned} h_0 - h_1 + h_2 - h_3 &= 0, \\ -h_1 + 2h_2 - 3h_3 &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

І, нарешті з умови нормування отримаємо

$$h_0 + h_1 + h_2 + h_3 = \sqrt{2}. \quad (5)$$

Вирішення рівнянь (3)–(5) визначає коефіцієнти фільтру низьких частот. Знаючи коефіцієнти низьких частот фільтра, можна визначити коефіцієнти високих частот фільтра за формулою:

$$g[n] = (-1)^n h[3-n], \quad (6)$$

Аналогічно знаходять коефіцієнти фільтрів для вейвлетів Добеші 8-го порядку. Коефіцієнти фільтрів вейвлетів Добеші наведено в табл. 2. Вони мають різні базисні функції, які визначають їх ефективність у різних задачах обробки зображень.

Вейвлет Добеші четвертого порядку має чотири нульові моменти, що дозволяє йому ефективно аналізувати відеосигнал, де присутні незначні зміни деталей, таких, як плавні переходи або однорідні текстури. Вейвлет Добеші восьмого

порядку має вісім нульових моментів і підходить краще для обробки відеосигналу зі складними деталями або високочастотними змінами, такими як різка зміна текстури або кадру, або велика кількість дрібних деталей.

*Стиснення методом Хаара.*

*Вейвлет Хаара* – один із перших та найпростіших вейвлетів. Він заснований на ортогональній системі функцій, запропонованій угорським математиком Альфредом Хааром в 1909 р.

Як і будь-яке інше дискретне вейвлет-перетворення, вейвлет Хаара є ітераційним методом та оперує з фільтрами високої та низької частоти на кожному рівні розкладання, що позначаються через  $j$  і приймають значення від  $j_{\max}$  до 0. Значення  $j_{\max}$  залежить від того, якою кількістю дискретних значень  $N$  представлено оригінальний сигнал. Для кількості значень застосовується обмеження у вигляді  $N=2^{j_{\max}}$ , що має виконуватися для подальшого розкладання сигналу та одержання набору вейвлет-коефіцієнтів кожного рівня  $j$ .

Процес декомпозиції – розкладання початкового сигналу на окремі складові та обчислення відповідних коефіцієнтів – відбувається за допомогою двох базисних функцій. Перша з них називається скейлінг-функцією, позначається через  $\varphi(x)$  та приймає одиничне значення на одиничному часовому інтервалі. Друга функція – це материнський вейвлет  $\psi(x)$ , вигляд якого відрізняє один вейвлет від іншого, наприклад, вейвлет Хаара від вейвлету Добеші. На кожному рівні розкладання  $j$  до функцій  $\varphi(x)$  та  $\psi(x)$  застосовуються дві основні операції – масштабування і зсув, в результаті чого утворюються декілька версій цих функцій різних масштабів. Ці масштабовані версії зсуваються вздовж часової вісі, перекриваючи весь одиничний інтервал. Через можливість аналізу сигналу на різних масштабах вейвлет-аналіз отримав альтернативну назву – кратномасштабний аналіз.

Розрізняють два види коефіцієнтів:

– коефіцієнти апроксимації, або *s-коефіцієнти*, які отримуються в результаті застосування фільтру низької частоти і описують низькочастотну

Таблиця 2

Коефіцієнти фільтрів Добеші

Порядок вейвлету	Коефіцієнти фільтру низьких частот	Коефіцієнти фільтру високих частот
4	$h[0] = \frac{1 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, h[1] = \frac{3 + \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, h[2] = \frac{3 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}, h[3] = \frac{1 - \sqrt{3}}{4\sqrt{2}}$	$g[n] = (-1)^n h[3 - n]$
8	$h[4] = -0.1870, h[5] = 0.0308, h[6] = 0.0329, h[7] = -0.0106$	$g[n] = (-1)^n h[7 - n]$

складову (тренд) сигналу на кожному рівні розкладання;

– коефіцієнти деталізації, або *d-коефіцієнти*, які отримуються в результаті застосування фільтру високої частоти і описують високочастотну складову (шуми, флуктуації навколо тренду) на кожному рівні розкладання.

Кількість вейвлет-коефіцієнтів на кожному рівні різна. Процес обчислення коефіцієнтів починається з максимального рівня  $j_{\max}$  до мінімального  $j=0$ . На максимальному рівні присутні лише *s-коефіцієнти*, тоді як на всіх інших – *s-* та *d-коефіцієнти*. На останньому, нульовому рівні розкладання присутній лише один *s-коефіцієнт* та один *d-коефіцієнт*. У позначеннях обох видів коефіцієнтів використовуються два нижніх індекси ( $s_{j,k}$  та  $d_{j,k}$ ), де індекс  $j$  вказує на поточний рівень вейвлет-розкладання, а індекс  $k$  – на внутрішній лічильник всередині одного рівня, що позначає позицію масштабованої версії скейлінг-функції  $\varphi(x)$  та материнського вейвлету  $\psi(x)$  на часовій вісі. Коефіцієнти нульового рівня позначаються як  $s_{0,0}$  та  $d_{0,0}$ .

Обчислення коефіцієнтів можна припинити на будь-якому рівні, наприклад, якщо вейвлет-аналіз використовується для згладження сигналу, що актуально, наприклад, в задачах прогнозування часових рядів, коли важливо передбачити загальний характер зміни сигналу, а не детальні короткотермінові флуктуації. Тоді для прогнозування використовується тренд, що являє собою згладжену в більшому або меншому степені версію оригінального сигналу і обчислюється на базі *s-коефіцієнтів* певного рівня розкладання.

На кожному з рівнів розкладання можна реконструювати оригінальний сигнал, «зібравши» *s-коефіцієнти* поточного рівня та *d-коефіцієнти* поточного та всіх попередніх рівнів розкладання. Реконструйований сигнал не відрізняється від оригіналу, якщо використовується метод вейвлет-аналізу без втрат (див. табл. 1), наприклад, вейвлет Хаара.

ДВП одержують застосуванням набору фільтрів. Сигнал пропускається через низькочастотний (low-pass) фільтр з імпульсним відгуком  $g$ , і виходить згортка:

$$y[n] = (x \cdot g)[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] g[n-k]$$

Одночасно сигнал розкладається за допомогою високочастотного (high-pass) фільтра  $h$ . В результаті виходять деталізуючі коефіцієнти (після ВЧ-фільтра) та коефіцієнти апроксимації (після НЧ-фільтра).

$$y_{low}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] g[2n-k]$$

$$y_{high}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k] g[2n-k]$$

Материнський вейвлет Хаара приймає одиничне значення в інтервалі  $[0;0.5]$ , значення “-1” в інтервалі  $[0.5;1]$ , та нульове значення в усіх інших точках. Скейлінг-функція, як і для інших вейвлетів, приймає одиничне значення в інтервалі  $[0;1]$  та нуль за його межами. Хоча вейвлети Хаара є досить добре локалізованими в просторі (що є необхідною умовою для материнських вейвлетів всіх видів), вони, однак, не ідеально локалізовані в частотному діапазоні через широкий спектр частот меандра [5, с. 674–693].

Критерієм вибору кількості рівнів розкладання служить ступінь близькості оригінального сигналу та тренду відповідного рівня. Цей параметр обчислюють як похибку наближення за різними алгоритмами.

При обробці двовимірних даних, як, наприклад, зображення, обчислення вейвлет-коефіцієнтів відбувається аналогічно з тією різницею, що вони також є двовимірними.

На рис. 1 наведено фотографію головного корпусу КПШ ім. Ігоря Сікорського, до якої будуть застосовані вейвлет-перетворення Хаара та перетворення в орієнтованому базисі (ОБ).



Рис. 1. Фото головного корпусу КПШ імені Ігоря Сікорського, що використовувалося для порівняння алгоритмів стиснення методом Хаара та вейвлету в орієнтованому базисі

В табл. 3 наведено значення параметрів близькості оригінального та стисненого за допомогою вейвлету Хаара зображення.

В таблиці прийняті наступні позначення: **MSE** – середньоквадратична похибка (Mean Squared Error); **Max. Error** – максимальна похибка; **BPP** – розмірність, бітів на піксель (Bits Per Pixel) [6, с. 1–18].

Таблиця 3

**Параметри близькості згладженої функції та оригінального зображення на різних рівнях розкладання для вейвлету Хаара**

Рівень розкладання	MSE	Max. Error	BPP	Коефіцієнт стиснення %	Розмір, кбайт
1	10.29	138	7.233	92.09	205
2	10.43	138	4.8026	58.07	158
3	11.22	138	3.122	38.9	79.1
4	12.43	143	1.644	13.78	30.7
5	15.40	143	1.5	7.7	15.2
6	27.13	146	1.1	3.56	7.4
7	62.33	164	1.02	1.82	3.5

Таблиця 4

**Формули для обчислення коефіцієнтів ОБ-вейвлет перетворення**

Пряме ОБ-вейвлет перетворення	Зворотне ОБ-вейвлет перетворення
$s_{j-1,k} = \frac{1}{\sqrt{3}} [s_{j,3k} + s_{j,3k+1} + s_{j,3k+2}];$ $d_{j-1,k}^{(1)} = \frac{1}{\sqrt{3}} [s_{j,3k} - s_{j,3k+1}];$ $d_{j-1,k}^{(2)} = \frac{1}{\sqrt{3}} [s_{j,3k} - s_{j,3k+2}].$	$s_{j,3k} = \frac{1}{\sqrt{3}} [s_{j-1,k} + d_{j-1,k}^{(1)} + d_{j-1,k}^{(2)}];$ $s_{j,3k+1} = \frac{1}{\sqrt{3}} [s_{j-1,k} - 2d_{j-1,k}^{(1)} + d_{j-1,k}^{(2)}];$ $s_{j,3k+2} = \frac{1}{\sqrt{3}} [s_{j-1,k} + d_{j-1,k}^{(1)} - 2d_{j-1,k}^{(2)}].$

Таблиця 5

**Порівняння результатів стиснення зображення**

	Розмір зображення	MSE	Max. Error	BPP	Коефіцієнт стиснення, %
Оригінал	152 кбайт	0	0	1	100
Хаара	80.7 кбайт	9.18	49	1	54
ОБ	93.7 кбайт	433.31	199	1	61.3

Таблиця 3 ілюструє вплив рівня розкладання на якість стиснення зображення (MSE, Max. Error), розмір стисненого зображення (BPP) та розмір вихідного зображення. Таким чином, в залежності від практичної задачі обробки можна обирати параметри перетворення.

Стиснення зображень за допомогою вейвлетів в орієнтованому базисі.

На відміну від перетворення Хаара, яке оперує з двома фільтрами, вейвлет-перетворення в орієнтованому базисі оперує з  $m$  фільтрами розкладання, з яких один – низькочастотний, а  $(m-1)$  – високочастотні. Величина  $m$  визначається з довжини інтервалу оригінального сигналу – кількості його дискретних значень, на яку накладається обмеження у вигляді  $N=m^n$ . В цьому виразі  $m$  має бути простим позитивним числом, а  $n$  – цілим позитивним числом.

В табл. 4 наведено формули для обчислення коефіцієнтів прямого та зворотного перетворення при  $m=3$  [8, с. 14–18]. Пряме перетворення визна-

чає коефіцієнти апроксимації та деталізації функції, зворотне – дозволяє отримати функцію – оригінал по вейвлет коефіцієнтам.

В таблиці прийнято наступні позначення: коефіцієнти апроксимації  $s_{j,k}$  являють собою середнє значення оригінального сигналу на інтервалі розгляду  $k$ , кратному  $m$ , а коефіцієнти деталізації  $d_{j,k}^{(1)}, d_{j,k}^{(2)}, \dots, d_{j,k}^{(m-1)}$  містять інформацію про високочастотні флуктуації оригінального сигналу.

*Порівняння вейвлетів Хаара та ОБ*

Стиснення зображення (рис. 1) було проведено в середовищі програмування Python. Результати роботи методів наведені в табл. 5.

При порівнянні методів встановлено, що середньоквадратична помилка фільтрації MSE є значно більшою для перетворення ОБ, що свідчить про вищий рівень помилок відновлення порівняно з перетворенням Хаара. Коефіцієнт стиснення на 7% більший для ОБ, ніж для вейвлету Хаара. Розмір зображення для ОБ на 13 кбайт більше порівняно з вейвлетом Хаара.

## Стиснення відео

Порівнюємо результати стиснення відеоданих із застосуванням вейвлет-перетворень Хаара, Добеші 4-го та 8-го порядку. Для порівняння використаємо відео з БПЛА, де чітко видно рухомий об'єкт (автомобіль), рис. 2.



Рис. 2. Скріншот відео з БПЛА

Порівнювати будемо за такими параметрами: розмір файлу, частота кадрів, MSE, PSNR та SSIM. MSE показує відхилення стиснутого відео від оригіналу, чим вище значення PSNR, тим краще стиснене відео за якістю, SSIM вказує на структурну схожість з оригіналом. Параметри MSE, PSNR та SSIM будуть вказані середні (Average) Вони усе-реднюють характеристики кадрів відео.

Стиснені зображення наведено на рис. 3.

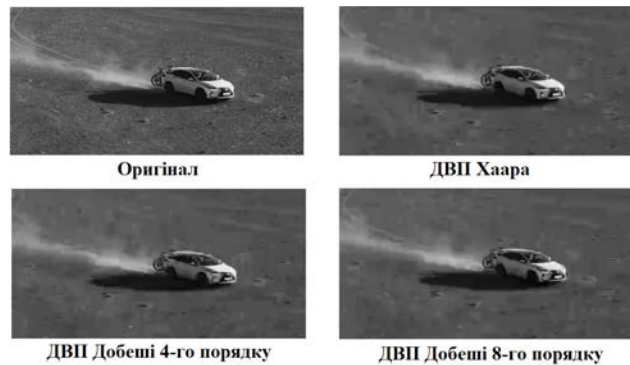


Рис. 3. Скріншоти відео, стисненого різними вейвлет-перетвореннями

**Висновки.** Порівняльний аналіз різних вейвлет-перетворень показав значну перевагу вейвлету Хаара перед ОБ-вейвлет. Ця перевага стає більш суттєвою зі збільшенням рівня розкладання. Отже, для задач стиснення зображень найбільш ефективним є вейвлет Хаара, що пояснюється простим виглядом материнської функції, яка приймає значення +1 та -1, та відповідно високою швидкістю обчислень.

При обробці відео з БПЛА вибір методу залежить від конкретної практичної задачі. Вейвлет Хаара доцільно використовувати, коли пріоритетною є якість зображення, а вейвлети Добеші 8-го порядку мають перевагу у ступені стиснення.

Таблиця 6

## Порівняння результатів стиснення відео

	Розмір відео	Частота кадрів	Average MSE	Average PSNR	Average SSIM
Оригінал	5637 кбайт	30	0	$\infty$	1
Хаара	667 кбайт	30	55.01	30.75	0.7982
Добеші 4-го порядку	668 кбайт	30	57.82	30.53	0.7986
Добеші 8-го порядку	663 кбайт	30	58.63	30.47	0.7975

## Список літератури:

1. Knysh B. The classification of the certain types of the unmanned aerial vehicles. Knysh B., Brovko P., Popil D.. International periodic scientific journal. Modern engineering and innovative technologies. Heutiges ingenieurwesen und innovative technologien. – 2017. – №2. – С. 34–39. <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/23161>
2. Arafat M. Y., Alam M. M., Moh S. Vision-Based Navigation Techniques for Unmanned Aerial Vehicles: Review and Challenges. Drones. 2023. Т. 7, № 2. С. 89. URL: <https://doi.org/10.3390/drones7020089>.
3. Білинський Й. Й. Методи стиснення зображень [Електронний ресурс]. Й. Й. Білинський, К. В. Огородник, М. Й. Юкиш [Електронний ресурс]: – Електрон. дані (1 файл). – Режим доступу: [https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/firen/6bilynskij\\_elektronni\\_systemy/57.htm](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/firen/6bilynskij_elektronni_systemy/57.htm)
4. Contributors to Wikimedia projects. Daubechies wavelet – Wikipedia. Wikipedia, the free encyclopedia. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Daubechies\\_wavelet](https://en.wikipedia.org/wiki/Daubechies_wavelet) (дата звернення: 04.06.2024).
5. Mallat, S.G. (1989). "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation" (PDF). IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 11 (7): 674–693. doi:10.1109/34.192463
6. Image Quality Assessment through FSIM, SSIM, MSE and PSNR—A Comparative Study. SCIRP. URL: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=90911>.
7. Негода А. М. Аналіз сучасних алгоритмів стиснення відео. ISSN 1990-5548 Електроніка та системи управління / ІАЕУ НАУ. – 2010 – С. 23-27. <https://jrnl.nau.edu.ua/index.php/ESU/article/view/822/800>.

8. Терещенко Т. О. Вейвлет-перетворення для фільтрації зображень із відеокамер спостереження Т. О. Терещенко, Ю. С. Ямненко, О. Л. Мельниченко, М. В. Панченко. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки. – 2018. – Том 29(68) Ч. 2 № 3 – С. 14–18. [https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/3\\_2018/part\\_2/5.pdf](https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2018/3_2018/part_2/5.pdf)

9. Патлаєнко М. О. Підвищення ступеня стиснення тв-зображень за допомогою рекурентних перетворень і хвильових алгоритмів : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.12.17. – Одеса, 2020.. – С. 22. 0421U100088.pdf

### **Tereshchenko T.O., Yamnenko Yu.S., Kushchynsky E.O., Yemets O.O. COMPARISON OF IMAGE COMPRESSION ALGORITHMS BASED ON WAVELETS**

*The article discusses modern requirements for video image processing systems used in unmanned aerial vehicles (UAVs). UAV technology has rapidly evolved, becoming an essential tool in military operations, agriculture, research, and even entertainment. Therefore, image compression algorithms that help reduce file sizes while retaining crucial image details are vital in enhancing the efficiency of such systems. The promising application of image compression algorithms in UAVs is evident, especially where efficient data transmission and storage are critical.*

*The article analyzes image and video compression algorithms based on wavelets, focusing on continuous Daubechies wavelets of the 4th and 8th orders, discrete Haar wavelets, and transformation in the oriented basis (OB). Each of these algorithms presents specific strengths and weaknesses, making them optimal for different types of images and application contexts. For example, Daubechies wavelets are particularly effective in handling complex signals with high-frequency variations, which ensures that significant details are preserved even when compressing complex video footage.*

*Image compression using wavelet transform is an effective method that reduces file size while preserving important details. Daubechies wavelets belong to the class of continuous wavelets. The article considers two types from the Daubechies wavelet family: wavelets of 4th and 8th orders, with four and eight zero moments, respectively. The 4th-order Daubechies wavelet allows for better analysis of signals with small changes, while the 8th-order wavelet is more effective for complex signals with high-frequency variations. This characteristic makes the latter ideal for analyzing dynamic scenes in video, where rapid changes in texture or frame content occur.*

*Discrete wavelets, particularly those based on the Haar transform and the OB method, offer additional benefits when processing images with local details, such as edges and textures. The Haar wavelet method is computationally efficient and simple to implement but may result in some loss of image quality. On the other hand, the OB method enables a more detailed analysis of image structures, though it demands greater computational resources. Simulation results show that while both Haar and OB methods reduce file size, some image quality is sacrificed in the process.*

*The choice of the best compression algorithm ultimately depends on the specific requirements of the task at hand, balancing file size reduction and the preservation of image quality.*

**Key words:** video processing, unmanned aerial vehicles, image compression algorithms, discrete and continuous wavelet transforms, Daubechies wavelets, Haar transform, oriented basis transform.



# ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 623.437-526:007.52]:623.365

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.5.2/24>

**Янко А.С.**

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

**Лактіонов О.І.**

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

**Михайліченко О.В.**

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

**Крук О.О.**

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

## АНАЛІЗ ТА ШЛЯХИ РЕАЛІЗАЦІЇ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ РОЗМІНУВАННЯ НА РОБОТОТЕХНІЧНІЙ ПЛАТФОРМІ

*Стаття присвячена формуванню теоретичних основ щодо інструментарію для розмінування на робототехнічній платформі. Основними цілями розмінування є ефективне, економічне, надійне, швидке та максимально безпечне виявлення та очищення від боєприпасів та мін забруднених вибухонебезпечними предметами території. Проблема, що пов'язана з розмінуванням характеризується величезною різноманітністю характеру вибухонебезпечних боєприпасів, складністю погодних умов, а також типом рельєфу.*

*У статті проведено аналіз інструментів розмінування та приклади їх застосування на роботизованих платформах. Аналізується важливість автоматизації і використання таких систем у процесах знешкодження вибухонебезпечних предметів, які становлять серйозну загрозу для життя людей на територіях, що постраждали від військових конфліктів. Основна увага приділяється аналізу різних сенсорних систем, а саме металошукачів, георадарів і хімічних аналізаторів, для підвищення точності виявлення мін, а також допоміжних технологічних механізмів. Максимальне задіяння мультисенсорних систем в процесі розмінування, а саме етапі виявлення вибухонебезпечних об'єктів, є дієвим інструментом.*

*Проведено комплексний аналіз актуальності потреби удосконалення існуючих та розробки нових мобільних робототехнічних платформ для реалізації процесу розмінування місцевості. Розглянуто популярні рішення з залученням робототехнічних комплексів, які використовуються для знешкодження боєприпасів та мін.*

*Здійснено порівняльний аналіз переваг даних робототехнічних платформ відповідно до умов використання.*

*Розкрито важливість автономності та мобільності таких платформ для ефективного розмінування на рельєфній місцевості чи за складних погодних умов.*

*Результати дослідження підкреслюють важливість подальшого розвитку гібридних технологій і стандартів для спрощення процесу розмінування та підвищення його ефективності та зниження собівартості.*

**Ключові слова:** автономність платформи, вибухонебезпечний предмет, георадар, металошукач, механізм переміщення, міношукач, мультисенсорна система, робототехнічна платформа.

**Постановка проблеми.** Знешкодження вибухонебезпечних предметів є однією з найважливіших і найскладніших гуманітарних і технічних проблем сучасності. Мінні поля, що утворилися

внаслідок збройних конфліктів і актів тероризму, зробили величезні території по всьому світу небезпечними для проживання людей, сільськогосподарської діяльності та реконструкції інфраструк-

тури. Міни, боеприпаси, що не вибухнули, та інші вибухонебезпечні предмети, промислового чи саморобного типу, можуть залишатися активними протягом десятиліть та навіть більше після завершення бойових дій, загрожуючи життю місцевого населення.

Сучасні методи розмінування є надзвичайно небезпечними, трудомісткими і дорогими, бо здебільшого це ручна робота груп розмінування. Навіть із застосуванням спеціалізованого обладнання і саперної техніки, наприклад, металошукачів, людський фактор залишається головною причиною нещасних випадків під час розмінування. Тому пошук нових методів виявлення та розмінування є головним викликом як для наукової спільноти, так і для організацій, що беруть участь у постконфліктних гуманітарних місіях.

Внаслідок збройної агресії росії, Україна стала однією з країн з найвищим рівнем замінування у світі. За попередніми оцінками, 30 відсотків загальної площі України (174 000 км<sup>2</sup>) потенційно наражені на небезпеку, а гуманітарне розмінування займе десятиліття [1, с. 1]. Для розмінування територій нашої держави міжнародними партнерами надано низку машин механізованого розмінування (дані за 2023 рік) [2, с. 24]. Тому розмінування особливо актуальне питання для України, для вирішення якого необхідно залучення високотехнологічних та надійних методів та інструментів.

Існуючі технології виявлення, такі як металодетектори і георадари, мають обмеження в умовах складного рельєфу і наявності неметалевих мін. Крім того, автономні операції у важкодоступних районах вимагають розробки роботизованих платформ з більш чутливими датчиками і системами управління. Необхідно розробляти і впроваджувати інноваційні рішення, в тому числі роботизовані системи, щоб прискорити операції з розмінування, знизити витрати і забезпечити безпеку.

Важливим питанням постає автономність роботи та мобільність технічного обладнання. У зонах конфлікту, особливо на пересіченій місцевості, віддалене керування може працювати не коректно. Для роботи в таких умовах потрібні такі системи, що здатні самостійно орієнтуватися на місцевості і приймати рішення відповідні до поставлених задач, що створює додатковий виклик для забезпечення ефективного розмінування. Щоб застосувати ці технології в реальних умовах треба розробляти більш гнучкі стандарти та технології-помічники, що спростять технологічну гібридизацію.

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

Аналіз останніх досліджень і публікацій з питань розмінування та використання робототехнічних систем показує, що тема активно розвивається у зв'язку зі зростаючою потребою у зменшенні ризиків для життя людей та підвищенні ефективності гуманітарних місій.

Дослідження потреби у нових інструментах вказує, що нинішні підходи до розмінування з використанням собак, зондів, металошукачів і механічних пристроїв не можуть впоратися з глобальним очищенням від мін. Потрібні нові інструменти. Зокрема, у сферах обстеження мінних полів, ближнього виявлення мін, забезпечення якості після розмінування і створення нових технологій для забезпечення безпеки людей [3, с. 598].

Оскільки неможливо знешкодити всі міни в усьому світі, існує постійна потреба в більш ефективних і результативних операціях з розмінування за рахунок поліпшеного і належного збору даних, аналізу і використання нових технологій. Дослідження вказує на вдосконалення систем підтримки прийняття рішень для належного управління даними, обміну даними в загальній хмарі і визначення пріоритетності територій, які підлягають розмінуванню, що сприятиме підвищенню ефективності операцій з розмінування [4, с. 145].

Крім технічних та організаційних методів, дослідження пов'язані з розробкою сучасного методу алгоритмів планування руху для мобільних роботів необмеженої форми, які автоматично орієнтуються в районах для гуманітарного розмінування. Оскільки через форми конструкції робота спостерігається недосконале проходження траєкторії та слідування вказаному маршруту, що потребує удосконалення алгоритмів слідування шляху [5, с. 488].

**Постановка завдання.** Метою цього дослідження є підвищення ефективності та безпеки операцій з розмінування шляхом аналізу існуючих технологій розмінування та розробки методів їх застосування на роботизованих платформах. Це вимагає детального аналізу існуючих технологій розмінування, таких як металодетектори, георадари і магнітометри, з акцентом на їхню здатність точно виявляти наземні міни в різних умовах місцевості.

**Виклад основного матеріалу.** Виявлення небезпечних об'єктів на поверхні або під ґрунтом автоматичним або автоматизованим способом дозволить зберегти людські життя. Ці функції можна робити дистанційним чином керуючи не

лише робототехнічною платформою, а й положенням сенсорів [6, с. 26]. Передумовою діагностики ґрунту відповідними сенсорами є аналіз його типу. Якість розпізнавання небезпечних об'єктів корелюється із властивостями ґрунту, зокрема магнітними й електричними [7, с. 370].

У напрацюванні [8, с. 1] для виявлення небезпечних об'єктів використано одноплатний комп'ютер, котрий керує рухом робота й металодетектора засобами Android. Перевагами запропонованого підходу є використання для внутрішньої й зовнішньої навігації.

Крім металодетекторів виявлення аномалій ґрунту здійснюється за допомогою георадарів, що являють залежну від часу електромагнітну техніку, яка може надавати 2D або 3D радіолокаційні зображення надр з високою роздільною здатністю [9, с. 311].

Ще одним із сенсорів виявлення небезпечних об'єктів ґрунту є магнітометр, де магнітне поле вимірюється лише за допомогою відбитого сигналу від поляриметра [10, с. 2].

Визначивши основні види сенсорів проведемо аналіз існуючих платформ для визначення найбільш розповсюджених і вигідніших шляхів реалізації даних інструментів.

Типовий представник автоматизованих платформ є серія ANDROS, вагою 102 кг, використовується інженерним корпусом армії Ізраїлю та іншими підрозділами, Роботи серії ANDROS, що випускаються з 2005 року, в першу чергу призначені для утилізації боєприпасів, але можуть нести і летальну зброю із-за модульної конструкції сенсорних блоків [11, с. 1].

Деякі автоматизовані платформи конструктивно створені так, що мають два або більше роботизованих маніпулятори. Компактна гусенична система компанії ICOR класу Caliber, створена для використання двома особами служб швидкого реагування, які перевіряють і вилучають підозрілі пристрої в автобусах, поїздах і літаках [12, с. 3].

Провівши аналіз ринку США та Європи, популярності набирають саме гібридно-ходові платформи з мобільними колісно-гусеничними деталями для збільшення якості ходових характеристик зі зменшенням загальної маси та створення модульних корпусів для можливості створення більш різноманітних варіацій платформ від виробника. Типовими представниками є Cobham TeleMAX EOD/IEDD, Telerob EVO Hybrid та tEODor EVO [13, с. 1].

Беручи до уваги існування двох типів платформ та їх гібридів для забезпечення достатньої мобіль-

ності роботизованої платформи робимо висновок, що гусеничний хід є більш затребуваний незважаючи на вартість та складність ремонту. Механічна частина якісніше реагує на випадкові підриви та пошкодження, ніж колісна платформа та має кращі ходові якості. Але гусеничний хід є дорогим механізмом.

Здебільшого у робототехнічних комплексах використовується колісна база 4x4, але існують випадки, коли використовується механізми триколісного переміщення рис. 1 [14, с. 1].

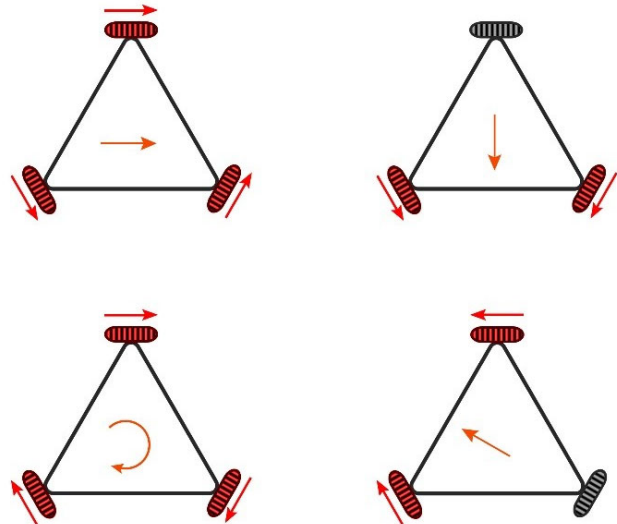


Рис. 1. Механізм переміщення робототехнічного комплексу [14, с. 1]

Тип конструкції робототехнічної платформи впливає на особливості монтування додаткових механізмів. Пропонована у попередній роботі робототехнічна платформа [15, с. 96], на колісній базі, має не широкі колеса й суттєвий дорожній кліренс. Це робить конструкцію надійною до можливого підриву, але цей факт потрібно досліджувати шляхом низки експериментів. Крім того платформа має унікальні електронні модулі керування, котрі потрібно налаштовувати й досліджувати їх функціонування.

Попри переваги запропонованого рішення лишається не у повному обсязі вирішена проблема щодо тестування систем керування додаткових механізмів робототехнічної платформи. Існуючі середовища монтажу й програмування контролерів, зокрема Wokwi, Tinkercad зорієнтовані на обмежену кількість інструментів й не містять у своїй структурі одноплатних комп'ютерів.

Одним з шляхів вирішення вказаної проблеми може бути використання симуляторів робототехніки, зокрема Gazebo simulator. У якості операційної системи, як один з варіантів, можна

використати Robot Operating System й додаткові бібліотеки.

Розвиток запропонованої ідеї потребує використання віртуальних технологій, з метою налаштування вхідних текстів програм. Наприклад, у напрацюванні [16, с. 2] створено цифровий прототип робота Pepper за допомогою інструментів ROS 2, зокрема Gazebo Sim, MoveIt 2, Rviz2. Для верифікації прототип робота діагностовано засобами Choregraphe. Але запропонований робот не мав спеціалізованих механізмів для транспортування чи виявлення вибухонебезпечних об'єктів.

Відоме використання удосконаленої ROS для роботів на орбіті, де запропоноване рішення було верифіковано у режимі реального часу [17, с. 3]. Це складно реалізоване завдання, де робот працює на орбіті. Як видно з напрацювань [16, 17] операційна система ROS є основою для побудови роботів різних типів.

Але існують ще більш удосконалені рішення, де основою є автопілот різних транспортних засобів, зокрема й робототехнічних платформ. Це дозволяє моделювати різні сценарії рухів робототехнічних платформ [18, с. 8099]. Крім того, автопілот використовується й для комунікації між кількома робототехнічними платформами.

Перевагами розглянутих інструментів досліджень є можливість використовувати їх безкоштовно, при цьому з можливістю моделювання різних сценаріїв дій робототехнічної платформи. Але прохідність антимінних роботизованих платформ ще не досягла тієї позначки, коли вибір є абсолютним. Проблем з переміщенням по різних типах місцевості залишається достатньо.

Для ефективного виявлення небезпечних об'єктів існують моделі прийняття рішень, котрі моделюють різні сценарії дій [19, с.2]. Прийняття рішень здійснюється як лінійними алгоритмами, так і генетичними. На ухвалені рішення щодо розмінування може вплинути земельний покрив й морфологічний індекс будівлі, що показано у напрацюванні [20, с.4]. За результатами дослідів отримано точність карти 90,67% на досліджуваній площині 643 660,28 м.

Враховуючи опрацьований матеріал, чітко зрозуміло, що робототехнічна платформа повинна мати інструменти розмінування, котрі слід досліджувати системно. Для цього варто обрати тип інструменту розмінування, середовище моделювання рухами робототехнічної платформи й інструмент ефективного прийняття рішень.

**Висновки.** Завдяки аналізу інструментів розмінування та способів їх застосування на роботизованих платформах визначено, що автоматизація процесу розмінування за допомогою таких платформ знижує ризики для команд розмінування та цивільного населення. Автономні системи та дистанційне керування роботами пришвидшують роботу та зменшують економічні витрати. Прикладом успішного рішення є роботизовані платформи серії ANDROS, які демонструють високу надійність і здатність адаптуватися до складних умов. Розробка та інтеграція сенсорних систем, таких як металодетектори, георадари, магнітометри може значно підвищити точність і надійність операцій з розмінування в різних умовах місцевості. Гібридизація ходу, модульність компонентів – зменшить ціновий поріг створення та модифікування існуючих платформ для розмінування.

#### Список літератури:

1. Розмінування України – потенційно забруднено більше 174 тис. кв. км території. *MRPL.CITY*. URL: <https://mrpl.city/news/view/v-ukraini-potentsijno-zabrudneno-minami-174-tis-kv-km-tse-chvert-teritorii-ukraini> (дата звернення: 04.09.2024).
2. Звіт про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2023 році. 34 с. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/0/4/5/2/3/6/zvit-pro-osnovni-rezultati-diiialnosti-dsns-u-2023-roci.pdf> (дата звернення: 04.09.2024).
3. Schäfer J., Kopf N., Häring I. Empirical risk analysis for Humanitarian Demining. *9th Future Security Research Conference* (Berlin, September 16–18, 2014). Berlin, 2014. P. 598–601. URL: <https://doi.org/10.24406/publica-fhg-385383>
4. Humanitarian Demining and the Cloud: Demining in Afghanistan and the Western Sahara / P. Schmitz et al. *Service-Oriented Mapping*. 2019. P. 143–146. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-72434-8\\_7](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-72434-8_7)
5. Dakulovic M., Petrovic, I. Complete coverage path planning of mobile robots for humanitarian demining. *Industrial Robot*. 2012. Vol. 39, no. 5. P. 484–493. URL: <https://doi.org/10.1108/01439911211249779>
6. Masunaga S., Nonami K. Controlled Metal Detector Mounted on Mine Detection Robot. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2007. Vol. 4, no. 2. P. 26. URL: <https://doi.org/10.5772/5692>
7. Takahashi K., Preetz H., Igel J. Soil properties and performance of landmine detection by metal detector and ground-penetrating radar – Soil characterisation and its verification by a field test. *Journal of Applied Geophysics*. 2011. Vol. 73, no. 4. P. 368–377. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.02.008>
8. Sensor for Landmine Detection using Unmanned Vehicle Metal Detector and Mobile Computing Technology. *lupinepublishers.com*. URL: <https://lupinepublishers.com/environmental-soil-science-journal/>

fulltext/sensor-for-landmine-detection-using-unmanned-vehicle-metal-detector-and-mobile-computing-technology.ID.000194.php (дата звернення: 16.09.2024).

9. Wang M.L., Birken R. Sensing solutions for assessing and monitoring roads // Lynch J.P., Sohn H., Wang M.L. (eds.) *Sensor Technologies for Civil Infrastructures (Second Edition)*. Woodhead Publishing. 2022. P. 299–330. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102706-6.00020-9>

10. Pradhan S. Three axis vector atomic magnetometer utilizing polarimetric technique. *Review of Scientific Instruments*. 2016. Vol. 87, no. 9. Article no. 093105. URL: <https://doi.org/10.1063/1.4962021>

11. Remotec Andros Titus. 2013. 4 p. URL: [https://www.militarysystems-tech.com/sites/militarysystems/files/supplier\\_docs/Andros%20Titus.pdf](https://www.militarysystems-tech.com/sites/militarysystems/files/supplier_docs/Andros%20Titus.pdf) (дата звернення: 21.09.2024).

12. MK3 CALIBER® - ICOR Technology - Tactical & Security Robotics Products. *ICOR Technology - Tactical & Security Robotics Products*. URL: <https://icortechnology.com/robots/mk3-caliber/> (дата звернення: 24.09.2024).

13. Cobham Mission Systems - Military Systems and Technology. *International Defence & Aerospace Industry Portal*. URL: <https://www.militarysystems-tech.com/suppliers/eod-iedd-equipment-eod-robots-and-service-vehicles/cobham-mission-systems-unmanned-systems> (дата звернення: 21.09.2024).

14. Get Rolling with Omni-Directional Wheels. *Servo Magazine*. URL: <https://www.servomagazine.com/magazine/article/get-rolling-with-omni-directional-wheels> (дата звернення: 24.09.2024).

15. Моделювання базової конструкції робототехнічної платформи / О. Лактіонов та ін. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2024. no. 3. P. 95–99. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-13>

16. Beyond Simulation: Unlocking the Frontiers of Humanoid Robot Capability and Intelligence with Pepper's Open-Source Digital Twin / H. Sekkat et al. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, iss. 14. Article no. e34456. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e34456>

17. Ramón J. L., Pomares J., Felicetti L. Task space control for on-orbit space robotics using a new ROS-based framework. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2023. Vol. 127. Article no. 102790. URL: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2023.102790>

18. ADArduPilot: an ArduPilot compatible adaptive autopilot\* / P. Li et al. *IFAC-PapersOnLine*. 2023. Vol. 56, no. 2. P. 8097–8104. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.964>

19. Camacho-Sanchez C., Yie-Pinedo R., Galindo G. Humanitarian demining for the clearance of landmine-affected areas. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2023. Vol. 88. Article no. 101611. URL: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101611>

20. Killeen J., Jaupi L., Barrett B. Impact assessment of humanitarian demining using object-based peri-urban land cover classification and morphological building detection from VHR Worldview imagery. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2022. Vol. 27. Article no. 100766. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100766>

## **Yanko A.S., Laktionov O.I., Mykhailichenko O.V., Kruk O.O. ANALYSIS AND WAYS OF IMPLEMENTATION OF MINE CLEARING TOOLS ON A ROBOTIC PLATFORM**

*The article is devoted to the formation of theoretical foundations for the tools for demining on a robotic platform. The main goals of demining are effective, economical, reliable, fast and as safe as possible identification and clearance of ammunition and mines contaminated by explosive objects. The problem associated with demining is characterized by a huge variety of the nature of explosive ammunition, the complexity of weather conditions, as well as the type of terrain.*

*The article analyzes demining tools and examples of their use on robotic platforms. The importance of automation and the use of such systems in the processes of disposal of explosive objects, which pose a serious threat to the lives of people in the territories affected by military conflicts, is analyzed. The main focus is on the analysis of various sensor systems, namely metal detectors, ground-penetrating radars and chemical analyzers, to improve the accuracy of mine detection, as well as supporting technological mechanisms. The maximum use of multi-sensor systems in the demining process, namely the stage of detecting explosive objects, is an effective tool.*

*A comprehensive analysis of the urgency of the need to improve existing and develop new mobile robotic platforms for the implementation of the process of demining the area was carried out. Considered popular solutions involving robotic complexes, which are used for the disposal of ammunition and mines.*

*A comparative analysis of the main advantages of these robotic platforms in accordance with the conditions of use was carried out.*

*The importance of autonomy and mobility of such platforms for effective demining on terrain or in difficult weather conditions is revealed.*

*The results of the study emphasize the importance of further development of hybrid technologies and standards for simplifying the demining process and increasing its efficiency and reducing cost.*

**Key words:** platform autonomy, explosive object, ground-penetrating radar, metal detector, movement mechanism, mine detector, multi-sensor system, robotic platform.

## Відомості про авторів

**Абдулін М.З.** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Акмалдінова В.Є.** – доктор філософії, доцент кафедри організації авіаційних робіт та послуг Національного авіаційного університету

**Баранов І.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобільного транспорту Державного вищого навчального закладу «Приазовський державний технічний університет»

**Берневек Т.І.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

**Біда П.І.** – кандидат технічних наук, викладач Відокремленого структурного підрозділу «Рівненський фаховий коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України»

**Булакевич С.В.** – викладач Відокремленого структурного підрозділу «Рівненський фаховий коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України»

**Варлан Т.Є.** – асистент кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету

**Володченко М.А.** – інженер спеціальної випробувальної лабораторії НВЦ Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Волошин А.О.** – кандидат технічних наук, професор кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету

**Волошин Д.А.** – аспірант кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету

**Воробйова В.І.** – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Дощенко Г.Г.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії

**Дульський А.І.** – аспірант кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Ємець О.О.** – бакалавр Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Залужний Д.С.** – аспірант кафедри технології неорганічних речовин та екології ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки та технологій

**Карп Г.В.** – аспірант кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

**Кириллова В.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Навчально-наукового інституту морського бізнесу Одеського національного морського університету

**Кириллова О.В.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт Навчально-наукового інституту морського бізнесу Одеського національного морського університету

**Концевой А.Л.** – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Концевой С.А.** – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Крук О.О.** – аспірант кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій, спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

**Куник А.А.** – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Кучеренко В.Ю.** – старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету

**Кушнірук О.М.** – викладач Відокремленого структурного підрозділу «Рівненський фаховий коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України»

**Кущинський Є.О.** – бакалавр Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Лактіонов О.І.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

**Ларіна І.М.** – викладач Одеського національного морського університету

**Логінов О.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету

**Магамадов О.Р.** – кандидат технічних наук, професор кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт Навчально-наукового інституту морського бізнесу Одеського національного морського університету

**Майзеліс А.О.** – доктор технічних наук, старший дослідник, доцент кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Мельник Л.І.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Мельник О.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету

**Михайліченко О.В.** – аспірант кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій, спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

**Мірошникова М.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

**Мовчанюк О.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Наговський Д.А.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації судового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії

**Орестова М.В.** – провідний інженер ТОВ «Фарма Старт»

**Остапенко А.А.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Петриченко Є.А.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Морські перевезення» Національного університету «Одеська морська академія»

**Петрова О.М.** – викладач Відокремленого структурного підрозділу «Рівненський фаховий коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України»

**Присяжнюк В.В.** – кандидат технічних наук, начальник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання НВЦ Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Прохоров В.К.** – аспірант кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

**Решетков Д.М.** – кандидат технічних наук, доцент, професор Одеського національного морського університету

**Русіна Н.Г.** – кандидат педагогічних наук, викладач Відокремленого структурного підрозділу «Рівненський фаховий коледж Національного університету біоресурсів і природокористування України»

**Семичасівський С.В.** – старший науковий співробітник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання НВЦ Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Сільванська Г.М.** – кандидат економічних наук, доцент кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

**Сірий О.А.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Інституту теплоенергетичних технологій Національної академії наук України

**Скиба М.І.** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри технології неорганічних речовин та екології ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки та технологій

**Скиба Ю.М.** – аспірант кафедри технології неорганічних речовин та екології ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки та технологій

**Соломаха А.С.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Терещенко Т.О.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електронних пристроїв і систем факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Фомін О.В.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державного університету інфраструктури та технологій

**Шабан В.Є.** – студент (магістр) факультету «Транспортних технологій» Державного вищого навчального закладу «Приазовський державний технічний університет»

**Шибасв О.Г.** – доктор технічних наук, професор кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

**Ямненко Ю.С.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електронних пристроїв і систем факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Янко А.С.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

**Ярошевич М.В.** – аспірантка кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Науковий журнал

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ  
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

**Серія: Технічні науки**

**Том 35 (74) № 5 2024**

**Частина 2**

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: [editor@tech.vernadskyjournals.in.ua](mailto:editor@tech.vernadskyjournals.in.ua)

Сторінка журналу: [www.tech.vernadskyjournals.in.ua](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua)

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 14,81. Ум. друк. арк. 18,83. Зам. № 1124/776.

Підписано до друку 31.08.2024. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефони: +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.