

**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) № 1 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 геоінженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Дубко Валерій Олексійович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри вищої математики Київського національного університету технологій 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 загально-інженерних 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 № 10 від 21.03.2024 року)**

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано Міністерством юстиції України (Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого ЗМІ серія КВ № 22895-12795Р від 11.08.2017 року)

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

ISSN 2663-5941 (Print)

ISSN 2663-595X (Online)

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

ЗМІСТ

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Кутковецька Т.О.

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ВНУТРІШНЬОГРУНТОВОГО ВНЕСЕННЯ
РІДКИХ ОРГАНІЧНИХ ДОБРІВ.....1

Рудасьов В.Б., Головіна О.В., Якубовський О.М., Москаленко Г.В.

АНАЛІЗ УМОВ І НАПРУГИ ТЕРТЯ ПРИ ШТАМПУВАННІ ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ
ІЗ СТАЛЕЙ ПІДВИЩЕНОЇ МІЦНОСТІ..... 6

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Бунько В.Я., Дарморіс П.М.

АНАЛІЗ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ПОБУДОВИ ОСЦИЛОГРАМ РОБОТИ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО
ТЕРМІНАЛУ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ, АВТОМАТИКИ ТА ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ.....16

Голошапов С.С., Колебанов О.К., Іванов А.А.

ІННОВАЦІЙНИЙ МЕТОД РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ21

ПРИЛАДИ

Баженів В.Г., Гльойнік К.А., Лабунський П.І.

АВТОМАТИЧНА ВИХРОСТРУМОВА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ З ФІКСАЦІЄЮ КООРДИНАТ
ДЕФЕКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОЇ МИШІ..... 26

ЕНЕРГЕТИКА

Боженко М.Ф., Камишний Б.М.

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ
ДИМОВИХ ГАЗІВ КОТЕЛЕНЬ.....34

Бошкова І.Л., Волгушева Н.В., Капауз К.О.

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СУШІННЯ ЗЕРНА ВІВСА
ПРИ МІКРОХВИЛЬНО-КОНВЕКТИВНОМУ ПІДВОДІ ЕНЕРГІЇ..... 40

Кутний Б.А., Чернецька І.В., Шнейдер С.В.

ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ
ТА ГЕЛІОКОЛЕКТОРІВ ДЛЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО БУДИНКУ.....45

Пантелєєва І.В., Шматько Н.М.

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ СХЕМ ВИДАЧІ ПОТУЖНОСТІ ОБ'ЄКТІВ РОЗПОДІЛЕНОЇ
ГЕНЕРАЦІЇ ТА РОЗМІЩЕННЯ ДЖЕРЕЛ ГЕНЕРАЦІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ..... 50

Семичаєвський С.В., Самченко Т.В.

АНАЛІЗ ПРИЧИН МОЖЛИВИХ ПОЖЕЖ В МАШИНИХ ЗАЛАХ
ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ.....56

МЕТАЛУРГІЯ

Босий М.В., Кропівний В.М., Кузик О.В., Кропівна А.В.

ДО ПИТАННЯ ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ
НА СТРУКТУРУ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СІРОГО ЧАВУНУ.....63

Єфімова В.Г., Смірнов Ю.О., Пилипенко Т.М.

ВИДАЛЕННЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ З РОЗПЛАВУ СТАЛІ
У ПРОМІЖНОМУ КОВШІ ЗА РАХУНОК ЇХ АБСОРБЦІЇ ШЛАКОВОЮ ФАЗОЮ..... 67

Єфімова В.Г., Смірнов Ю.О., Пилипенко Т.М.

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНОГО МЕХАНІЗМУ РОЗЧИНЕННЯ
ЧАСТИНОК НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ У РАФІНУВАЛЬНОМУ ШЛАКУ
ПРОМІЖНОГО КОВША..... 72

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

- Воробйова В.І., Андрух Ю.М., Морозова Д.О., Зємцова В.В., Васильєв Г.С., Скиба М.І., Скиба Ю.М.**
ДОБІР СКЛАДОВИХ ДЛЯ СИНТЕЗУ ЕКОЛОГІЧНИХ ІОННИХ РІДИН
НОВОГО ПОКОЛІННЯ НА ОСНОВІ КВАНТОВО-ХІМІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ78
- Золотарьова О.В.**
ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ УМОВ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ
КОНЦЕНТРОВАНИХ НАТРІЄВИХ ФОФАТІВ..... 85
- Іванченко А.В., Сорока О.В., Воронов В.В.**
ВИЛУЧЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ ІЗ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ ЛІГНОЦЕЛЮЛОЗНИМ
СОРБЕНТОМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ АДСОРБЕРА З ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ.....91
- Коваль М.Г.**
ДОСЛІДЖЕННЯ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ФАРБУВАЛЬНО-ОПОРЯДУВАЛЬНОГО
ВИРОБНИЦТВА АДСОРБЦІЙНИМ МЕТОДОМ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛІТУ...96
- Melnyk L.I., Cherniak L.P., Yevpak V.V.**
COMPOSITES BASED ON FLY ASH WITH DIFFERENT POLYMER MATRIXES.....106
- Мініна Ю.О., Мітіна Н.Б., Третьяков А.О.**
ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ БІОДЕГРАДАЦІЇ ПОЛІМЕР-ПОЛІМЕРНИХ СУМІШЕЙ
В ПРОЦЕСІ ВЕРМІКУЛЬТИВУВАННЯ.....113
- Фролова Л.А., Нікітін М.О., Родін Д.О.**
СТРУКТУРНІ, ОПТИЧНІ ТА МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОДИСПЕРСНИХ ФЕРИТІВ
 $MN_xCO_yZN_{1-x-y}FE_2O_4$ (ДЕ $0 < X < 1$ ТА $0 < Y < 1$).....118

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

- Фролова Н.Е., Ворона Ю.В., Вишневська Л.В., Бобін М.А.**
РОЗРОБЛЕННЯ ДІСТИЧНИХ ТА АЮРВЕДИЧНИХ СТРАВ ДЛЯ ЗАКЛАДІВ
РЕСТОРАННОГО ГОСПОДАРСТВА.....125

ТРАНСПОРТ

- Бех Я.П., Бех П.В., Лашков О.В., Кузьменко А.І.**
МЕТОДИ ЗАСТОСУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ ВАНТАЖНОЇ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ПОЛІГОНУ...131
- Бондаренко Ю.А., Онищенко С.П.**
СТРУКТУРА ТА НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ КОНТЕЙНЕРОПОТОКІВ У СИСТЕМІ
МОРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ..... 139
- Висоцька І.І., Соловійова О.О., Соколова О.Є., Борець І.В., Валько А.М.**
СТРАТЕГІЧНИЙ РОЗВИТОК АЕРОПОРТУ «БОРИСПІЛЬ» В ПОВОЄННИЙ ПЕРІОД.....147
- Вишневський Д.О., Вишневська О.Д.**
ВИЗНАЧЕННЯ ПРІОРИТЕТНОГО ПІДХОДУ ЩОДО ВІДБОРУ ІНФОРМАЦІЇ
ПРИ ОРГАНІЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ.....156
- Гаража О.П., Шевчук Д.О., Гаврилюк С.О.**
ЕКОНОМІЧНА ДІЯЛЬНІСТЬ АВІАЦІЙНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ: АНАЛІЗ ТА ВИКЛИКИ.....164
- Доля К.В., Доля О.Є.**
КОМПЛЕКСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ МАРШРУТІВ.....171
- Коскіна Ю.О., Решетков Д.М., Тихонін В.І.**
ВАНТАЖОПОТОКИ ЕКСПОРТНИХ СУХИХ МАСОВИХ ВАНТАЖІВ У ПОРТАХ УКРАЇНИ179
- Фомін О.В., Козинка О.С., Безлуцький В.О., Литвиненко А.С.**
ЗОВНІШНІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ СКЛАДОВИХ
РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ.....185
- Хітров І.О., Кононогов Ю.А.**
ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ ТА СПОСОБИ
ДЛЯ ЙОГО ЗДІЙСНЕННЯ.....191

Черненко П.В., Цебрюк І.В. РОЗРАХУНКИ ЩОДО ОБЛАДНАННЯ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ ЦЕХУ ЛАКОФАРБОВОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ АВТОБРОНЕТАНКОВОЇ ТЕХНІКИ.....	197
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

БУДІВНИЦТВО

Семичаєвський С.В., Присяжнюк В.В., Осадчук М.В., Якіменко М.Л., Свірський В.В. ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ І МЕТОДІВ ВИПРОБУВАНЬ З'ЄДНУВАЛЬНИХ ГОЛОВОК ТА ПОЖЕЖНИХ НАПІРНИХ РУКАВІВ.....	203
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

ЕЛЕКТРОНІКА

Burkovskiy Ya. Yu., Zinkovsky Yu.F. GALLIUM NITRIDE SEMICONDUCTORS: TRANSFORMING THE TELECOMMUNICATION SYSTEMS POWER SUPPLY PERFORMANCE.....	211
Когдась М.Г., Притчин С.Е., Палагін В.А., Оксанич А.П., Драгобецький В.В., Ломонос А.І. УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ МЕХАНІЗМУ УТВОРЕННЯ ПОРУВАТОГО ШАРУ P-SI.....	216
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	224

CONTENTS

INDUSTRIAL ENGINEERING

Kutkovetska T.O.

IMPROVEMENT OF TECHNICAL MEANS FOR INTERNAL SOIL APPLICATION OF LIQUIDS ORGANIC FERTILIZERS1

Rudasov V.B., Holovina O.V., Yakubovskiy O.M., Moskalenko G.V.

ANALYSIS OF CONDITIONS AND FRICTION STRESSES DURING STAMPING OF THIN SHEET HIGH-STRENGTH STEEL ROLLING.....6

ELECTRICAL ENGINEERING

Bunko V.Ya., Darmoris P.M.

ANALYSIS AND IMPLEMENTATION OF THE CONSTRUCTION OF OSCILLOGRAMS OF THE MICROPROCESSOR TERMINAL OF RELAY PROTECTION, AUTOMATICS AND DISPATCHING.....16

Gogloschapov S.S., Kolebanov O.K., Ivanov A.A.

INNOVATIVE REGULATION METHOD SPEED QUALITY OF ASYNCHRONOUS MOTORS.....21

EQUIPMENT

Bazhenov V.G., Gloinik K.A., Labunskiy P.I.

AUTOMATIC EDDY CURRENT INSPECTION SYSTEM WITH FIXING THE COORDINATES OF DEFECTS USING A COMPUTER MOUSE..... 26

POWER ENGINEERING

Bozhenko M.F., Kamyshnyi B.M.

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE ENERGY EFFICIENCY OF FLUE GAS HEAT UTILIZATION IN BOILER PLANTS.....34

Boshkova I.L., Volgusheva N.V., Kapauz K.O.

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF OAT GRAIN DRYING WITH MICROWAVE-CONVECTIVE HEATING.....40

Kutny B.A., Chernetska I.V., Shneider S.V.

COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF USING PHOTOVOLTAIC PANELS AND SOLAR COLLECTORS FOR HEAT SUPPLY OF AN INDIVIDUAL HOUSE.....45

Pantielieieva I.V., Shmatko N.M.

FEATURES OF THE DESIGN OF POWER SUPPLY SCHEMES OF DISTRIBUTED GENERATION FACILITIES AND PLACEMENT OF GENERATION SOURCES IN ELECTRICAL NETWORKS.....50

Semychayevsky S.V., Samchenko T.V.

ANALYSIS OF CAUSES OF POSSIBLE FIRES IN MACHINE ROOMS OF ENERGY ENTERPRISES.....56

METALLURGY

Bosyi M.V., Kropivnyi V.M., Kuzyk O.V., Kropivna A.V.

ON THE STUDY OF THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF GRAY IRON.....63

Yefimova V.G., Smirnov U.A., Pilipenko T.M.

REMOVAL OF NON-METALLIC INCLUDES FROM MELTED STEEL IN THE TUNDISH DUE TO THEIR ABSORPTION BY THE SLAG PHASE.....67

Yefimova V.G., Smirnov U.A., Pilipenko T.M.

STUDY OF THE PHYSICO-CHEMICAL MECHANISM OF DISSOLUTION OF PARTICLES OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN THE REFINING SLAG OF THE INTERMEDIATE BUCKET.....72

CHEMICAL TECHNOLOGY

Vorobiova V.I., Andrukhu Yu.M., Morozova D.O., Ziemtsova V.V., Vasylyev H.S.,

Skyba M.I., Skyba Yu.M.

SELECTION OF COMPONENTS FOR THE SYNTHESIS OF ENVIRONMENTAL IONIC LIQUIDS OF THE NEW GENERATION ON THE BASE OF QUANTUM-CHEMICAL CALCULATIONS.....78

Zolotarova O.V. STUDY OF THE OPTIMAL CONDITIONS OF THE PROCESS OF OBTAINING CONCENTRATED SODIUM PHOSPHATE.....	85
Ivanchenko A.V., Soroka O.V., Voronov V.V. REMOVAL OF HEAVY METALS FROM AQUEOUS ENVIRONMENTS BY LIGNOCELLULOSE SORBENT USING A PSEUDO-FLUIDIZED BED ADSORBER.....	91
Koval M.G. RESEARCH OF WASTEWATER TREATMENT OF DYEING AND FINISHING PRODUCTION BY ADSORPTION METHOD USING NATURAL ZEOLITE.....	96
Melnyk L.I., Cherniak L.P., Yevpak V.V. COMPOSITES BASED ON FLY ASH WITH DIFFERENT POLYMER MATRIXES.....	106
Minina Yu.O., Mitina N.B., Tretyakoff A.O. STUDY OF THE CONDITIONS OF BIODEGRADATION OF POLYMER-POLYMER MIXTURES IN THE PROCESS OF VERMICULTURE.....	113
Frolova L.A., Nikitin M.O., Rodin D.O. STRUCTURAL, OPTICAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF NANO-DISPERSE FERTITES $MN_xCO_yZN_{1-x-y}FE_2O_4$ (WHERE $0 < x < 1$ AND $0 < y < 1$).....	118

TECHNOLOGY OF FOOD PROCESSING AND CONSUMER GOODS INDUSTRY

Frolova N.E., Vorona Yu.V., Vyshnevskaya L.V., Bobin M.A. DEVELOPMENT OF DIETARY AND AYURVEDIC DISHES FOR RESTAURANT BUSINESS ESTABLISHMENTS.....	125
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

TRANSPORT

Bekh Ya.P., Bekh P.V., Lashkov O.V., Kuzmenko A.I. METHODS OF APPLICATION OF THE AUTOMATED MANAGEMENT SYSTEM FOR THE OPERATIONAL PLANNING OF TRUCK WORK OF THE RAILWAY LANDFILL SITE...	131
Bondarenko Yu.A., Onyshchenko S.P. THE STRUCTURE AND UNCERTAINTY OF CONTAINER FLOWS IN THE MARITIME TRANSPORTATION SYSTEM.....	139
Vysotska I.I., Soloviova O.O., Sokolova O.Ye., Borets I.V., Valko A.M. STRATEGIC DEVELOPMENT OF THE AIRPORT “BORYSPIL” IN THE POST-WAR PERIOD.....	147
Vyshnevskiy D.O., Vyshnevskaya O.D. DETERMINATION OF A PRIORITY APPROACH FOR THE SELECTION OF INFORMATION DURING ORGANIZATION OF CARGO CARRIAGES.....	156
Harazha O.P., Shevchuk D.O., Havryliuk S.O. ECONOMIC ACTIVITY OF THE AVIATION INDUSTRY OF UKRAINE: ANALYSIS AND CHALLENGES.....	164
Dolia K.V., Dolia O.Ye. COMPLEX MODELING OF THE ROUTE FUNCTIONING	171
Koskina Yu.O., Reshetkov D.M., Tykhonin V.I. TURNOVERS OF EXPORT DRY BULK CARGOES IN THE PORTS OF UKRAINE.....	179
Fomin O.V., Kozynka O.S., Bezlutskiy V.O., Lytvynenko A.S. EXTERNAL CONTROL SYSTEMS OF THE TEMPERATURE MODES OF RAILWAY ROLLING STOCK.....	185
Khitrov I.O., Kononogov Yu.A. RECOVERY OF PARTS BY PLASTIC DEFORMATION AND METHODS FOR ITS IMPLEMENTATION.....	191
Chernenko P.V., Tsebriuk I.V. CALCULATIONS REGARDING THE EQUIPMENT AND PRODUCTIVITY OF THE PAINT SHOP FOR ARMORED VEHICLES	197

CONSTRUCTION

Semychayevsky S.V., Prisyajnyuk V.V., Osadchuk M.V., Yakimenko M.L., Svirskiy V.V. JUSTIFICATION OF TECHNICAL REQUIREMENTS AND TESTING METHODS OF CONNECTING FIRE HOSE COUPLING AND FIRE PRESSURE HOSES.....	203
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

ELECTRONICS

Burkovskiy Ya.Yu., Zinkovsky Yu.F. GALLIUM NITRIDE SEMICONDUCTORS: TRANSFORMING THE TELECOMMUNICATION SYSTEMS POWER SUPPLY PERFORMANCE.....	211
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

Kogdas M.H., Prytchyn S.E., Palahin V.A., Oksanich A.P., Drahobetsky V.V., Lomonos A.I. IMPROVEMENT OF THE MODEL OF THE MECHANISM OF FORMATION OF THE P-SI POROUS LAYER.....	216
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

INFORMATION ABOUT AUTHORS.....	224
--------------------------------	-----

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 631.3 : [631.8]

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/01>**Кутковецька Т.О.**

Уманський національний університет садівництва

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ВНУТРІШНЬОГРУНТОВОГО ВНЕСЕННЯ РІДКИХ ОРГАНІЧНИХ ДОБРІВ

У статті проведені теоретичні дослідження щодо існуючих технічних засобів для внутрішньогрунтового внесення рідких органічних добрив та наведено конструкцію удосконаленого агрегату для даного виду робіт. В результаті виконаних досліджень нами було встановлено, що існує велика кількість сільськогосподарських машин для внесення рідких органічних добрив у ґрунт за різними способами та технологіями. Найбільш високою продуктивністю відзначені машини, що застосовуються за технологією поверхневого внесення розбризкуванням. Але в такій технології є недоліки, так як добрива нерівномірно розподіляються по поверхні ґрунту. А це є важливим показником у вирощуванні сільськогосподарських культур, тому що рівномірність внесення добрив впливає на нормальний ріст й розвиток рослин, і в подальшому на врожайність. За дослідженнями з'ясовано, що найбільш ефективним способом є внутрішньогрунтове внесення рідких органічних добрив. Щоб отримати хороши вплив добрив на ґрунт, при такому способі внесення, необхідно обов'язково ефективно закривати борозну. Для такої технології поширено використовуються глибокорозпушувачі з різною конструкцією. За результатами досліджень визначено, що глибокорозпушувач потрібно дообладнати шланговою системою з розподільником, і тільки в такому варіанті конструктивних складових буде забезпечено найбільш рівномірний розподіл добрив у ґрунті. В таких агрегатах, як робочі органи, доцільно використовувати чизельні лапи з відкрилками, що забезпечують максимальні зони поперечної деформації шарів ґрунту на велику глибину для хорошого розпушування ґрунту. Перевагою даного технічного рішення є те, що окрім якісного заробляння добрив у ґрунт, за допомогою чизельних лап, відбувається ще й розпушування ущільненого ґрунтового покриву, а за рахунок невеликої ширини захвату може використовуватися в господарствах з малими площами.

Ключові слова: сільськогосподарські машини, рідкі органічні добрива, внутрішньогрунтове внесення, сільськогосподарські культури, агрегати.

Постановка проблеми. Розвиток виробництва сільськогосподарських культур, пов'язаний не лише з використанням нових сортів і гібридів рослин, сільськогосподарської техніки та знарядь, а й із застосуванням агрохімічних засобів у достатній кількості для досягнення планових врожаїв із заданими параметрами якості продукції. При цьому не повинні змінюватися фізико-хімічні властивості ґрунту, тому в сучасному вирощуванні сільськогосподарських культур все частіше використовують органічні добрива [6, с. 90].

Органічні добрива, що представлені у вигляді рослинних і тваринних відходів, здійснюють прямий вплив на ґрунт та створюють сприятливі умови для росту й розвитку культурних рослин [7, с. 14].

Важливою проблемою, яка потребує термінового вирішення, є використання рідких та напів-

рідких органічних добрив. При наявності величезного вибору машин для транспортування та внесення рідких органічних добрив різними способами, зростають собівартість робіт й навантаження на навколишнє середовище через великі втрати поживних елементів, і як наслідок не адаптованості машин та недостатньо відпрацьованого застосування технологій в умовах конкретного господарства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вирішенню питань, що пов'язані з технічними засобами для внесення рідких органічних добрив присвячені роботи В.В. Гамаюнова [2, с. 232], О.А. Коваленка [2, с. 233], В.В. Медведєва [6, с. 88], Б.С. Носко [7, с. 13], В.М. Сало [3, с. 14] та ін. На сьогодні, існує ряд питань, що стосуються технічних засобів для внутрішньогрунтового внесення

рідких органічних добрив. Тому, дана проблема є актуальною та потребує подальших досліджень.

Мета роботи полягає в проведенні теоретичного дослідження щодо існуючих способів і технічних засобів для внутрішньогрунтового внесення рідких органічних добрив та їх удосконалення.

Виклад основного матеріалу. Як і всі провідні країни світу, Україна взяла курс на екологізацію виробництва, тобто все більшого використання органічних добрив у вирощуванні сільськогосподарських культур. Застосування відходів тваринного походження в якості удобрення рослин, доказало свою ефективність використання вже століттями. При цьому ґрунт отримує для росту рослин не тільки велику кількість найважливіших поживних речовин, органіки, а й мікроелементів [2, с. 238].

Для підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва із збереженням екології виробнику необхідно сумлінно підійти до вибору способу внесення органічних добрив та транспортних засобів.

Найбільш високою продуктивністю відзначені машини, що застосовуються за технологією поверхневого внесення розбризкуванням. Але в такій технології є суттєві недоліки: більше 25% добрив, що розбризкуються, нерівномірно розподіляються по поверхні ґрунту, а також високі втрати азоту внаслідок випаровування їх в атмосферу або поверхневого змиву, що може призвести до виникнення екологічних проблем. Внаслідок нерівномірного внесення добрив відбувається і нерівномірне сходження рослин, що в подальшому пливає на врожайність. Причому заорювання добрив орним агрегатом не може забезпечити досить рівномірний їх розподіл по поверхні ґрунту [1, 3, с. 12].

Найефективніший та екологічно безпечний технологічний прийом внесення рідких органічних добрив це – внесення під шар ґрунту з більш високою рівномірністю, яка може запобігти зараженню ґрунтів гельмінтами, патогенними організмами та у 7–10 разів утримати біогенні елементи, які містяться в добривах, у тому числі амонійний азот, що сприятиме збереженню навколишнього середовища [3, с. 14].

Способи внесення рідких органічних добрив наведені на рис. 1.

Поверхнєве внесення розбризкуванням (рис. 2, 3) рідких органічних добрив за допомогою відбивача визначається як розподіл добрив по поверхні ґрунту. Викиди аміаку при цьому

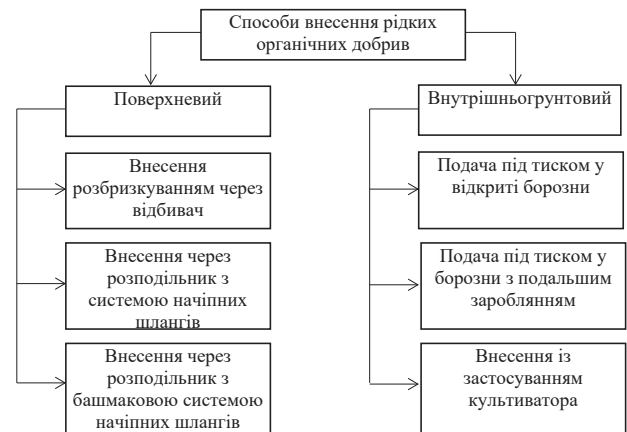


Рис. 1. Способи внесення рідких органічних добрив

способи, виражені у відсотках від загального амонійного азоту, як правило, знаходяться в межах 40–60%, мають високу нерівномірність внесення, існує ймовірність змиву добрив у водоймища [1].



Рис. 2. Поверхнєве внесення рідких органічних добрив розбризкуванням

Зазвичай робоча ширина захвату становить від 6 до 12 м, але також існують машини, що мають ширину захвату понад 24 м. Відстань між шлангами становить 250–350 мм. При великій ширині захвату такий спосіб не підходить для маленьких площ та полів зі схилами [5].



Рис. 3. Поверхнєве внесення рідких органічних добрив через розподільник з системою напіпних шлангів

Спосіб внутрішньогрунтового внесення рідких органічних добрив під тиском у відкриті борозни (рис. 4) призначений для використання на пасовищах або на орних землях з мінімальним передпосівним обробіткою ґрунту. При цьому ножі різної форми або дискові сошники прорізають у ґрунті вертикальні борозни глибиною

до 50 мм, для подальшого внесення добрив. Відстань між борознами становить 200–400 мм; робоча ширина агрегату – 6 м. Норму внесення необхідно відрегулювати так, щоб надлишки добрив не витікали на поверхню через відкриті борозни [10].



Рис. 4. Внутрішньогрунтове внесення під тиском рідких органічних добрив у відкриті борозни

Спосіб внесення під тиском рідких органічних добрив в борозну з подальшим зароблянням (рис. 5) поділяється на дрібне (глибина 50–100 мм) або глибоке (150–200 мм) внесення. Для отримання хорошого впливу добрив на ґрунт, при такому способі, обов'язково потрібно ефективно закривати борозну [4, 9].

Деякі агрегати для глибокого внесення мають ряд стійок, обладнаних двосторонніми відвалами або «гусячими лапами», для заглиблення в ґрунт та поперечного розподілу рідкого гною в ґрунті таким чином, щоб забезпечити відносно високі норми внесення. Вибір відстані між стійками визначається агротехнічними показниками та зазвичай становить 250–500 мм, робоча ширина становить 4 м [5].

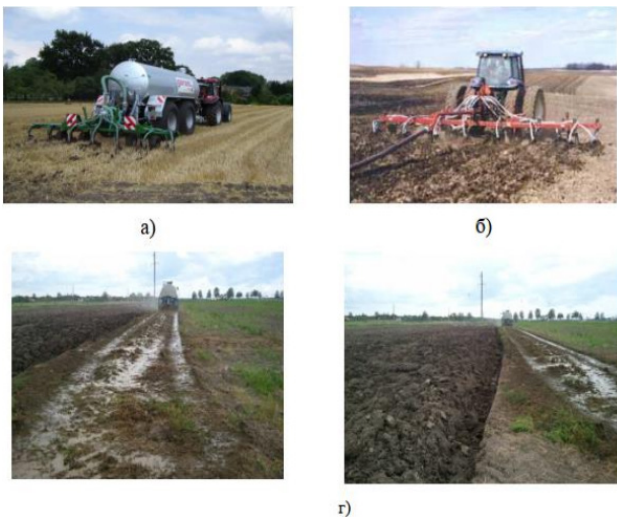


Рис. 5. Внутрішньогрунтове внесення рідких органічних добрив: а) і б) робочими органами у вигляді культиваторних лап; г) поверхнєве внесення розбризкуванням з подальшим зароблянням

Найбільш рівномірно та ефективно внутрішньогрунтове внесення рідких органічних добрив виконує глибокорозпушувач, що нарізає в ґрунті глибокі щілини до 0,5 м в які подаються органічні добрива [8].

На сьогодні є велика кількість глибокорозпушувачів будь-якого виробництва, тому розглянемо конструкцію деяких із них.

На рис. 6 представлений глибокорозпушувач багатофункціональний типу GZ, який має робочі органи у вигляді стійки з можливістю зміни глибини розпушування, що дозволяє йому проводити основний обробіток ґрунту до 45 см.



Рис. 6. Глибокорозпушувач багатофункціональний GZ

Недоліком такого агрегату є неможливість досягнення однакової якості виконання робіт на різній глибині обробітку.

Одним із можливих способів підвищення якості та зони розпушування оброблюваних ділянок є використання додаткових деформуючих елементів різної геометрії (рис. 7).



Рис. 7. Глибокорозпушувач Cansa KARINCA-500

Таку конструкцію доцільно використовувати для обробітку на глибині більше 45 см. Тому, що відрізаний шар піддається додатковому

стисненню від деформуючих елементів, а потім розтягуванню на транспортуючих частинах робочого органу, тобто додатково піддається деформаціям стиснення-розтягнення, що на думку ряду авторів, призводить до більш якісного кришення ґрунтового шару. Однак, недостатньо розроблена теорія взаємодії не дозволяє встановити раціональні параметри елементів, які розпушують ґрунт, тому що збільшення тягового опору не призводить до покращення якості розпушення.

Для використання вище описаних машин пропонується їх удосконалення шляхом дообладнання шланговою системою внесення рідких органічних добрив [5].

Нами запропонований комбінований агрегат (рис. 8), який включає такі конструкції: напірну шлангову систему для транспортування рідких органічних добрив від місця накопичення та зберігання до поля; чизельний глибокорозпушувач-щілинник з катком, що виконує розпушування ґрунту, інжекцію заданої дози добрив всередину ґрунту та вирівнювання поверхні поля.

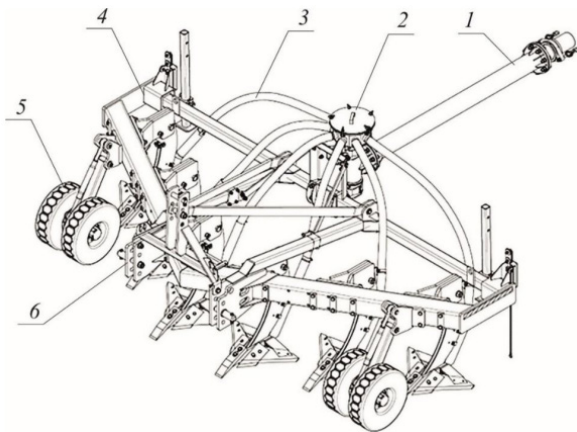


Рис. 8. Чизельний глибокорозпушувач для внутрішньогрунтового внесення рідких органічних добрив: 1 – шлангова магістраль; 2 – розподільний вузол рідких органічних добрив; 3 – розподільні шланги; 4 – рама з чизельними робочими органами; 5 – опорні колеса; 6 – навісний пристрій

Щоб відбувалася повна інфільтрація великих доз внесення (100 т/га та більше) рідких органічних добрив, шари ґрунту на значній глибині обробітку повинні бути ретельно розпушені. Тому, в агрегатах для внутрішньогрунтового внесення рідких органічних добрив, як робочі органи, доцільно використовувати чизельні лапи з відкрилками, що забезпечують максимальні зони поперечної деформації шарів ґрунту на велику глибину.

Для реалізації запропонованої технології агрегат (рис. 8) буде працювати наступним чином: шланговою магістраллю рідкі органічні добрива під тиском від насосної станції надходять до робочих органів через вузол прив'язки, далі через дросель потрапляють до розподільного пристрою обладнаного подрібнювачем, з нього трубопроводами вони подаються до чизельних лап в глиб ґрунтового шару. За допомогою чизельних лап відбувається розпушування ущільненого ґрунтового покриву. В основі даного технологічного процесу лежить різання ґрунту клином з плоскою робочою поверхнею, що зводиться до руйнування ґрунтового шару шляхом зсуву (сколювання) на шматки (стружку) трапецеїдальної форми.

Висновки. Таким чином, із вище зазначеного можна зробити висновки, що удосконалення глибокорозпушувачів і їх використання ще й для внутрішньогрунтового внесення рідких органічних добрив в сучасному виробництві є досить перспективним. Тому, що такі агрегати мають ряд переваг, а саме кращий обробіток ґрунту та рівномірне розподілення добрив в шарі ґрунту, що сприяють хорошему росту й розвитку рослин. І як наслідок в подальшому великих врожаїв. З точки зору екології відбувається менше шкідливих викидів в атмосферу. Таке технічне рішення доцільно випускати серійним виробництвом, так як за рахунок невеликої ширини захвату може використовуватися в господарствах з малими площами.

Список літератури:

1. Внесення рідких органічних добрив. *Агроном* : веб-сайт. URL: <https://www.agronom.com.ua/vnesennya-ridkiyh-organichnyh-dobryv/> (дата звернення: 16.01.2023).
2. Гамаюнова В.В., Коваленко О.А., Хоненко Л.Г. Сучасні підходи до ведення землеробської галузі на засадах біологізації та ресурсозбереження. Колективна монографія. За редакцією П.В. Писаренка, Т.О. Чайки, І.О. Яснолоб. Полтава ПДАА, 2018. С. 232–241.
3. Дейкун В.А., Сало В.М., Васильковський О.М. Аналіз способів внесення мінеральних добрив. *Наукові записки*. Кіровоград, КНТУ. 2004. Вип. 5. С. 12–15.
4. Культиватор для внесення гною : веб-сайт. URL: <https://atom-attachments.com/uk/product/applikator-dlya-vneseniya-zhidkih-udobreniy-slurry-applicator-7ds> (дата звернення: 18.01.2023).
5. Машини для внесення рідких добрив. *Agrotimes* : веб-сайт. URL: <https://agrotimes.ua/article/mashini-dlya-vneseniya-ridkiyh-dobryv/> (дата звернення: 17.01.2023).

6. Медведєв В.В. Фізичні та фізико – механічні властивості ґрунтів як основа для створення ґрунтоз-бережувальних знарядь і технологій обробітку. Міжвідомчий тематичний науковий збірник : *Агрохімія і ґрунтознавство*. Харків. 2014. С. 86–106.
7. Носко Б.С., Медведєв В.В., Непочатов О.П. Роль добрив у підвищенні ефективності землеробства в посушливих умовах. *Вісник аграрної науки*. 2000. № 5. С. 11–15.
8. Рідкі органічні добрива: внесення та технічне забезпечення. *Пропозиція* : веб-сайт. URL: <https://propozitsiya.com/ua/ridki-organichni-dobryva-vnesennya-ta-tehnichne-zabezpechennya> (дата звернення: 17.01.2023).
9. Baker J.L. A point-injector applicator to improve fertilizer management. *TRANSACTIONS of the ASAE*, 1989. v. 5. Jv3. p. 334.
10. Womak A.R., Probe-type Injector for Fluid Fertilizers. *TRANSACTIONS of the ASAE*, 1990. v. 6. № 2. p. 149.

Kutkovetska T.O. IMPROVEMENT OF TECHNICAL MEANS FOR INTERNAL SOIL APPLICATION OF LIQUIDS ORGANIC FERTILIZERS

The article conducts theoretical research on existing technical means for in-soil application of liquid organic fertilizers and provides the design of an improved unit for this type of work. As a result of our research, we found that there are a large number of agricultural machines for applying liquid organic fertilizers to the soil using various methods and technologies. The machines using surface spraying technology have the highest productivity. But this technology has drawbacks, as fertilizers are unevenly distributed over the soil surface. And this is an important indicator in the cultivation of agricultural crops, because the uniformity of fertilizer application affects the normal growth and development of plants, and subsequently the yield. According to research, it has been found that the most effective method is the intrasoil application of liquid organic fertilizers. In order to get a good effect of fertilizers on the soil, with this method of application, it is necessary to effectively close the furrow. Deep looseners with different designs are widely used for this technology. According to the research results, it was determined that the deep loosener needs to be equipped with a hose system with a distributor, and only in this version of the structural components will the most even distribution of fertilizers in the soil be ensured. In such units as working bodies, it is advisable to use chisel legs with openings that provide maximum zones of transverse deformation of soil layers to a great depth for good loosening of the soil. The advantage of this technical solution is that, in addition to the high-quality application of fertilizers into the soil, with the help of chisel paws, compacted soil cover is also loosened, and due to the small width of capture, it can be used in farms with small areas.

Key words: *agricultural machinery, liquid organic fertilizers, intrasoil application, agricultural crops, aggregates.*

Рудасьов В.Б.

Дніпровський державний технічний університет

Головіна О.В.

Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук

Якубовський О.М.

ВСП «Дніпровський фаховий коледж інженерії та педагогіки»

Державного вищого навчального закладу «Український державний хіміко-технологічний університет»

Москаленко Г.В.

ВСП «Технологічний фаховий коледж» Дніпровського державного технічного університету

АНАЛІЗ УМОВ І НАПРУГИ ТЕРТЯ ПРИ ШТАМПУВАННІ ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ ІЗ СТАЛЕЙ ПІДВИЩЕНОЇ МІЦНОСТІ

У статті розглянуті технологічні заходи, не пов'язані зі зміною форми заготовлі і інструменту, спрямовані на підвищення штампування сталей підвищеної міцності, використовуваних для виготовлення кузовних деталей автомобілів. У роботі запропоновано аналізувати напружено-деформований стан заготовлі, при зміні умов тертя використовуючи технологічні мастильні матеріали під час самого процесу листового штампування. В якості мастильних матеріалів досліджувались мінеральні олії (трансформаторна і індустріальна олії), жири, а саме, бавовняна і пальмова олії, та сухі мастильні матеріали, такі як графіт, дисульфід молібдену. У статті розглянута складова формули визначення загальної напругі втягування заготовлі у матрицю, а саме формула напруги, яка викликана тертям між заготовлею, притиском і матрицею на плоскій його частині. Встановлено, що при операції штампування-втягу умови тертя у фланці заготовлі, між притиском і матрицею і на закругленій матриці не ідентичні і не можуть бути описані однією функцією. Тому, в теорію визначення граничного коефіцієнта втягу тонколистового прокату для оцінки умов тертя на згині матриці введена величина напруги тертя на закругленій матриці – $\tau_{пр.м.}$, яка дозволяє отримати точніший розрахунок характеристики штампування. При проведенні експериментів був вибраний метод виміру сил тертя, заснований на принципі захоплення нерухомого зразка рухливим інструментом з силою, пропорційній величині сили тертя. За допомогою інтервальної оцінки статистичних параметрів експерименту були проведені дослідження взаємозв'язку напруги тертя і тиску в області відносно низьких навантажень, характерних для штампування із застосуванням технологічних мастильних матеріалів. За результатами дослідження запропоновано при штампуванні звичайних сталей і сталей підвищеної міцності використовувати дві характеристики тертя, а саме, в притиску при малих тисках – коефіцієнт тертя і на згині матриці при великих тисках – напругу тертя.

Ключові слова: листові сталі підвищеної міцності, напружено-деформований стан, напруга тертя, сили тертя, технологічні мастила для штампування.

Постановка проблеми. Вдосконалення технологічних процесів металообробки та виготовлення кузовних деталей автомобілів несе в собі ряд вагомих переваг і віддзеркалює загальні тенденції у розвитку автомобільної індустрії. Поліпшення цих технологій має потенціал підвищити конкурентоспроможність галузі, зменшити негативний вплив на довкілля та сприяти створенню безпечніших транспортних засобів.

У проведеному дослідженні [1, 2] виявлено, що використання сталей підвищеної міцності (СПМ) може вирішувати проблеми, пов'язані з безпекою, екологічністю та матеріаломісткістю у виробництві автомобілів. Однак у роботі акцентується, що, незважаючи на ці переваги, виробництво кузовних деталей автомобілів штампуванням представляє викликаюче завдання через труднощі об'єднання високої пластичності сталі з підвищеною міцністю. Ця складність виникає через тех-

нічні обмеження та труднощі в процесі обробки матеріалів. Таким чином, штампуванням важко досягти оптимального балансу цих двох властивостей, оскільки підвищення міцності часто призводить до зниження пластичності, і навпаки.

Цей виклик визначає необхідність подальших досліджень та розробки нових технологічних рішень з метою знаходження балансу між високою міцністю та пластичністю сталі при виробництві кузовних деталей автомобілів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оцінка штампування є важливою для визначення ефективності процесу листового штампування. Використання експериментальних та теоретичних методів дозволяє провести комплексну оцінку якості процесу та властивостей матеріалу. Зокрема, це допомагає ідентифікувати ключові фактори, які впливають на кінцевий результат, та розробляти стратегії для покращення ефективності виробництва та уникнення негативних наслідків локальних деформацій.

Важливим кроком у виробничому процесі листового штампування є вибір належного мастильного матеріалу. У дослідженні [1, 2] автори представили практичну методологію, використовуючи тестування глибокого витягу та аналіз кінцевих елементів для оцінки мастил для штампування в умовах, що найбільше наближені до виробничих. В ході цього дослідження було оцінено п'ять різновидів мастил для штампування, і виявлено, що застосування методів тестування глибокого витягу та аналізу кінцевих елементів надає можливість систематично оцінювати ефективність різних мастильних матеріалів.

У зв'язку з ключовими аспектами охорони здоров'я та екології зосереджуються значні зусилля на розробці та впровадженні виробничих змащувальних матеріалів, які отримують з природних ресурсів та не базуються на сировині нафтового походження. У роботі [3] представлено аналіз нового екологічно чистого змащувального матеріалу з метою визначення його потенціалу для використання в процесах штампування листового металу. Змащувальна речовина, що складається з масла канолі, змішаного з кристалами борної кислоти (5 мас.% з середнім розміром часток 100 мкм), істотно випередила інші змащувальні матеріали. Вона має природний та екологічно чистий склад.

У дослідженні [4] були оцінені трибологічні характеристики чотирьох базових мастил із різною хімічною структурою (парафінові і нафтові) та в'язкістю (2 і 20 сСт), а також води, щодо

їхнього використання при штампуванні сталевих листів. Отримані результати були порівняні з незмащеним контактом, що дозволило визначити оптимальні властивості для забезпечення ефективного процесу штампування.

У зв'язку із розширенням технічних можливостей, наукові дослідження в області листового штампування все більше зосереджуються на вдосконаленні технологічних процесів та покращенні властивостей використовуваних матеріалів, включаючи мастила. Різноманітність виробничих умов, зокрема перехід до штампування листових конструкцій із спеціальних металів, підкреслює необхідність уточнення застосування фізичних моделей процесів штампування-витягу із технічними мастилами, а також комплексного вивчення силових процесів деформації та врахування багатьох техніко-економічних показників.

Метою статті є розробка комплексу заходів з метою підвищення здатності сталей підвищеної міцності до штампування кузовних деталей автомобілів шляхом вибору складів технологічних мастильних матеріалів з подальшим аналізом напружено-деформованого стану заготовки.

Виклад основного матеріалу. Взаємодію пари (метал, що деформується, і інструмент), що третється, оцінюють найчастіше коефіцієнтом тертя ($f_{тр}$), що є функцією напруги тертя ($\tau_{тр}$) і тиску (q) – закон Амонтона:

$$\tau_{тр} = f_{тр} \cdot q. \quad (1)$$

Якщо зусилля, прагнуче викликати зміну форми кристалічного тіла, досягає критичного значення, то пластична деформація, що розвивається, супроводжується утворенням площин ковзання. Ковзання в кристалічній решітці твердого тіла по своєму механізму аналогічно ковзанню в граничному шарі при зовнішньому терті. В даному випадку правильніший двочленний закон тертя по Б.В. Дерягину:

$$\tau_{тр} = f_{тр} \cdot (q_0 + q) = \tau_0 + f_{тр} \cdot q, \quad (2)$$

де другий член відбиває вплив нормального тиску на міцність зв'язків в псевдо кристалічній решітці граничного шару.

У формулі (2) τ_0 відбиває адгезійну (зчеплення поверхонь різномірних твердих і/або рідких тіл) складову напруги тертя, яка не залежить від нормального тиску; p_0 – умовне значення нормального тиску, що відповідає йому.

Використання двочленного закону приведе до ускладнення в розрахунках, тому, залежно від значень величин τ_0 і $f_{тр}$ в практичному діапазоні умов, можна використати перший, або другий член рів-

няння (2), тобто закон постійності напруги тертя або закон Амонтона.

У цій роботі виходили з того, що напруга, пов'язана з умовами тертя на закругленні матриці порівняно з тертям у фланці, різна за величиною тиску у декілька разів, що зумовлює можливість їх опису різними функціями.

У основі машини тертя що імітує контактне тертя при штампуванні-витягу, був вибраний метод виміру сил тертя, заснований на принципі захоплення нерухомого зразка рухливим інструментом з силою, пропорційній величині сили тертя із застосуванням в якості вимірників динамометрів різних конструкцій. За величиною деформацій пружного елемента судили про силу або момент тертя. В якості імітуючої машини тертя була застосована пластинчата машина тертя. Схема вузла тертя експериментального пристрою представлена на рис. 1. Він складається з рухливої пластини 1 шириною 30 мм, виконаною з конструкційної сталі У10 твердістю HRC ≥ 50 , чистотою поверхні Ra $\leq 0,32$. Пластина 1 є у контакті із зразками 2, наклеєними на бурти державок 3, вставлених в пази нерухомих пластин 4 за допомогою направляючих типу «ластівчин хвіст». Зразки 2 виготовлялися з маловуглецевої сталі типу 08 завтовшки 1,2 мм.

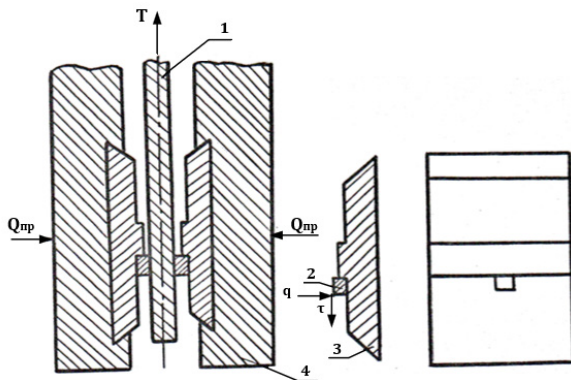


Рис. 1. Вузол тертя пластинчастої машини тертя
1 – рухлива пластина; 2 – зразки; 3 – державки;
4 – нерухомі пластини

Після наклейки зразків на державки поверхня їх знежирювалася ацетоном, і наносився шар випробовуваного мастила. Встановивши державки із зразками в нерухомі пластини, останні стискали з різними зусиллями притиску $Q_{пр}$ або тиском $p = Q_{пр} / F$, де F – площа контактної поверхні зразка 2, після чого відбувалося простягання рухливої пластини 1. Для того, щоб площа F була постійною і не залежала від тиску в цих дослідах, усі зразки перед випробуванням заздалегідь обтискалися із зусиллям $Q_{пр} = 7,0$ кН, після чого

для кожного зразка визначалася площа F . Шлях, пройдений пластиною 1, складав 45...60 мм, виміри проводилися на 15...30 мм шляху. Швидкість ковзання була рівною 10 м/с. При цьому рухлива пластина 1 з наклеєними на неї тензодатчиками опору під впливом виникаючого тертя розтягувалася більшою чи меншою мірою. Зусилля притиску фіксувалося також за допомогою отгарированих тензодатчиків опору.

Після визначення по осцилограмі сили тертя ($P_{тр}$) розраховували значення напруги тертя $\tau_{тр} = P_{тр} / 2F$, де $2F$ – площа контактної поверхні двох зразків 2, так як рухлива пластина 1 є у контакті з поверхнею двох зразків.

На рис. 2 представлені залежності напруги тертя від тиску в широкому діапазоні.

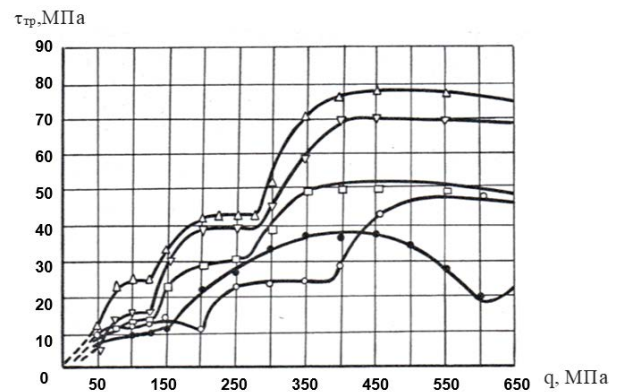


Рис. 2. Залежність напруги тертя від тиску для різних мастильних матеріалів в області високих тисків
△ – трансформаторна олія; ▽ – И-50А;
□ – вапор; ○ – пальмова олія; ● – графіт

Як видно з рис. 2, до певної величини тиску виконується закон Амонтона (1). У міру росту тиску величина напруги тертя перестає зростати, а потім можливо навіть її зниження. Для мастил на вуглеводневій основі зважаючи на поліморфізм (клітини мають різну форму, структуру і розмір) утворюваних ними кристалічних агрегатів і граничної плівки має місце три ділянки, на яких послідовно спостерігається постійність коефіцієнта тертя, а потім постійність напруги тертя. Якщо нехтувати цим поліморфізмом, то аж до 350...450 МПа можна умовно прийняти справедливості закону Амонтона, а при великих тисках – справедливості закону постійності напруги тертя. В умовах листового штампування величина тиску коливається в межах від 1 до 100...150 МПа. Цей діапазон досліджений недостатній. З приведених даних (рис. 2) виходить, що, строго кажучи, не можна припускати лінійне зростання напруги тертя з ростом тиску вже при тисках вище 50 МПа.

У зв'язку з цим були проведені дослідження взаємозв'язку напруги тертя і тиску в області відносно низьких навантажень, характерних для штампування. Для дослідження були вибрані три групи мастильних матеріалів, які застосовуються при штампуванні. До першої групи віднесені мінеральні олії різної в'язкості (рис. 3): трансформаторне, індустріальне 50 і циліндрове 52.

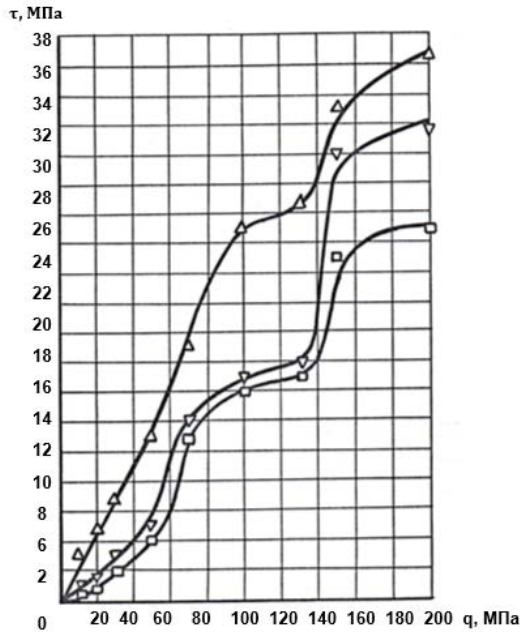


Рис. 3. Залежність напруги тертя від тиску для мінеральних олій в області низьких тисків
 △ – трансформаторна олія; ▽ – I-50A;
 □ – циліндрове 52

У другу групу віднесені жири – пальмові і бавовняні (рис. 4).

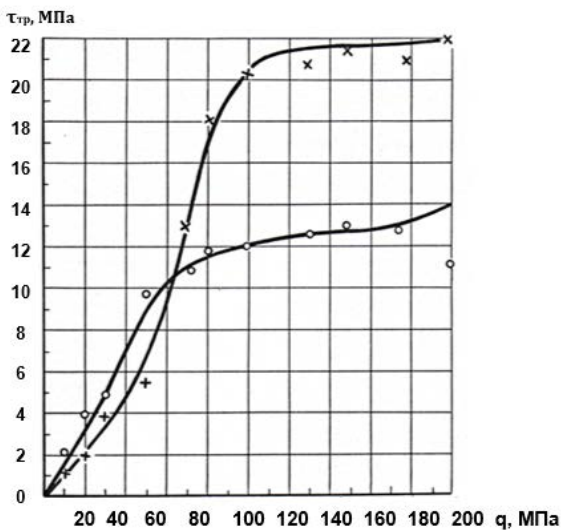


Рис. 4. Залежність напруги тертя від тиску для жирів в області низьких тисків
 + – бавовняна олія; ○ – пальмова олія

У третю групу – сухі мастила – графіт і дисульфід молібдену (рис. 5). Слід звернути увагу на те, що в нашому випадку застосовувалися сухі мастила в чистому вигляді. На практиці вони використовуються в суміші з оліями, що дозволяє отримати напругу тертя не вище, ніж з відповідною олією, а у більшості випадків істотно вище.

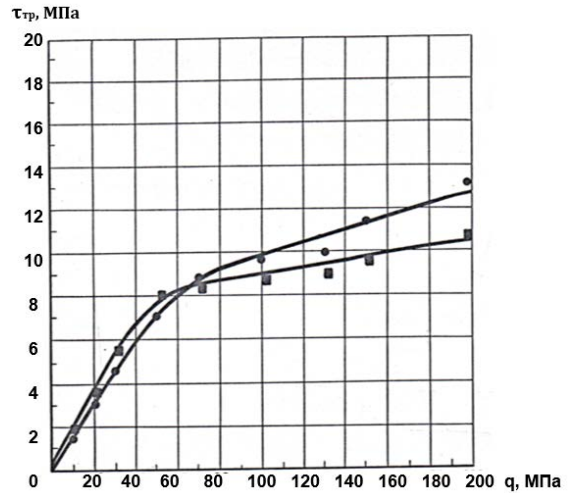


Рис. 5. Залежність напруги тертя від тиску для сухих мастил в області низьких тисків
 ■ – дисульфід молібдену; ● – графіт

З рисунків 3...5 витікає, що при тисках до 40...50 МПа досить точно виконується закон Амонтона. Таким чином, для опису умов тертя в притиску слід застосовувати закон Амонтона. При великих тисках очевидно, що він не виконується. У одних випадках має місце різке підвищення коефіцієнта тертя з ростом тиску і інтенсивний ріст напруги, а потім припинення цього росту і виникнення «майданчика», що характеризує незалежність напруги тертя від тиску. У інших випадках без зміни інтенсивності росту напруги, тобто при $f_{тр} = const$, починаючи з певного тиску, напруга тертя перестає змінюватися. З'являється сходинка. Потім характер ходу кривої повторюється, як це видно з рис. 2. Другий підйом напруги тертя відноситься до області тисків вище 150 МПа і не представляє інтересу для дослідження холодного листового штампування.

При дослідженні мінеральних мастил, так само при тисках вище 50 МПа, закон Амонтона не виконується, хоча і не була зафіксована ділянка постійності напруги тертя з ростом тиску.

Загальний характер залежності напруги тертя від тиску для графіту порівнянний із залежністю, отриманою при мастилі пальмовою олією.

Передбачалося, що тертя в процесі витягу склянки з листового матеріалу змішане. У тому

числі сухе тертя підкоряється закону Амонтона (1). Рідинне – закону Ньютона [10] $\tau_{тр} = z \cdot \text{ск} \cdot v/h$, де z – в'язкість, ск – поверхня ковзання, v – відносна швидкість ковзання, h – товщина шару мастила. Граничне тертя підкоряється своїм специфічним законам. Найбільш правильний опис процесу тертя дається двочленним законом тертя по Дерягину Б.В (2). Складання усіх цих закономірностей дає абсолютно невизначене вираження з багатьма невідомими. Крім того ми не знаємо пайової участі усіх видів тертя в процесі. Це є самостійним і дуже складним завданням, рішення якого нами не передбачалося.

Таким чином, при аналізі умов листового штампування при будь-яких вживаних мастилах в умовах тисків до 50 МПа слідє для розрахунку напруги тертя користуватися законом Амонтона. При великих тисках закон Амонтона не застосовний і для опису величини напруги тертя придатний або закон незалежності напруги тертя від тиску, або складніші залежності. Виходячи з цього результату, пропонується в розрахункових формулах при описі зони притиску користуватися законом Амонтона, що і має місце нині на практиці [11...13].

У літературі [11, 13, 14] вплив тертя на закругленій кромці матриці (рис. 6) на величину напруги тертя приблизно враховували на підставі рівняння Ейлера при ковзанні ремня по шківу [15]. В якості характеристики тертя пропонували використати значення коефіцієнта тертя $f_{тр}$.

При описі зони згину матриці, в якій тиск перевищує 50 МПа, авторами запропоновано користуватися значенням напруги тертя ($\tau_{тр,м}$), характерним для цього тиску:

$$\tau_{тр} = \tau_{тр,м} = T_{тр} / F_{ск} \quad (3)$$

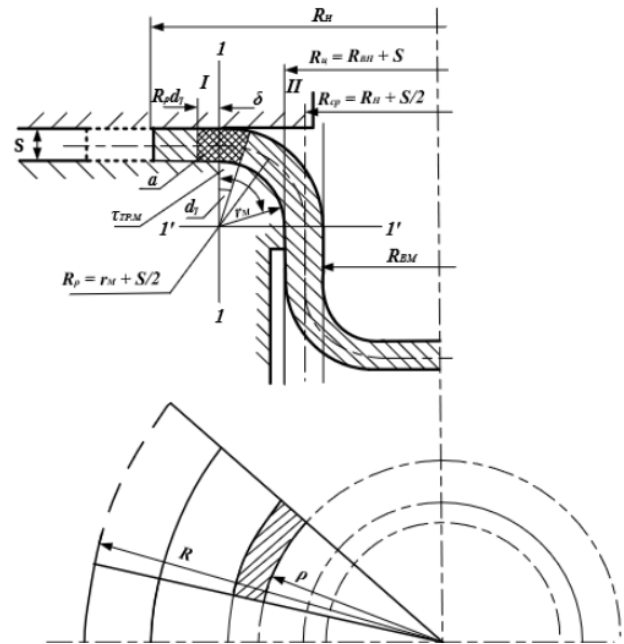


Рис. 6. Схема штампування-витягу циліндричної скляночки для аналізу діючих сил і напруги

Облік впливу тертя на закругленій кромці матриці постійною величиною напруги тертя при зрушенні [16] дозволив уточнити аналіз процесу витягу, отримати точнішу оцінку штампування, про що буде представлено нижче.

У таблиці 1 приведені значення величини $f_{тр}$ і $\tau_{тр}$, отримані експериментальним шляхом на пластинчатій машині тертя.

Розрахунок тисків з урахуванням вимірів максимального зусилля витягу і зусилля притиску з використанням веретенної олії в момент, передуючий руйнуванню, представлений в таблиці 2.

Таблиця 1

Значення коефіцієнта тертя та напруги тертя у функції тиску для різних мастил

Мастило	Коефіцієнт тертя, $f_{тр}$ при $q < 40$	Напруга тертя, t			Інтервал тисків, що відповідає постійності напруги тертя, МПа	Середня величина напруги тертя на «майданчиках» графіків, МПа
		$Q=40...80$ МПа	$Q=80...120$ МПа	$Q=120...160$ МПа		
Трансформаторна олія	0,235	8,5...22,5	22,5...25,5	25,5...34,0	95...130	25,0
Індустріальне 50	0,050	3,9...13,5	13,5...15,7	15,7...30,7	100...125	15,5
Циліндрове 52	0,050	2,6...12,4	12,4...14,6	14,6...24,5	105...130	14,5
Пальмова олія	0,160	7,0...11,5	11,5...12,4	12,4...12,6	90...170	12,5
Бавовняна олія	0,100	4,4...16,5	16,5...21,0	21,0	110...180	21,0
Графіт	0,075	5,7...8,5	8,5...9,0	9,0...11,5	Плавний купол	9,5
Дисульфід молібдену	0,090	6,7...8,5	8,5...9,1	9,1...9,5	Плавний купол	9,0

**Тиск в притиску і на згині матриці в момент, передуючий руйнуванню,
для заготовель з різних сталей товщиною 0,8 мм при витягу скляночки діаметром 50 мм**

Марка сталі	Тиск в притиску $q_{пр}$, МПа	Тиск на згині матриці, q_m , МПа	Зусилля витягу при штампуванні, $P_{вит.}$, кН	Зусилля притиску, $Q_{пр.}$, кН
08кп	1,56	86,5	49,8	10,5
08Ю	2,00	94,0	53,5	13,4
08ГСЮТ	1,92	127	73,5	12,8

При штампуванні тонколистового металу з маловуглецевих сталей 08кп і 08Ю зусилля витягу скляночки ($P_{вит.}$) діаметром 50 мм в окремих випадках досягає 55 кН. При цьому тиск на радіусі матриці складає близько 95 МПа, і закон тертя Амонтона не виконуватиметься. При штампуванні тонколистового прокату із сталей підвищеної міцності (тонколистовий прокат типу 08ГСЮТ, 03ХГЮ, вживаний для штампованих деталей автомобілів, зі зменшеною товщиною на 10...15% в порівнянні з маловуглецевими) зусилля витягу в тих же умовах в 1,4...1,7 разу вище, тобто знаходяться в діапазоні 55...80 кН. При цьому тиск на радіусі матриці буде більше 100 МПа і умови тертя також не підкоряються закону Амонтона. Значення напруги тертя може бути визначене з рис. 3...5 для відповідних мастильних матеріалів.

Для серії експериментів, приведених в таблиці 2, в усіх випадках необхідно використати дві характеристики тертя ($f_{тр}$ і $\tau_{тр}$). Проте досвід показує, що у більшості випадків для маловуглецевих сталей тиск на згині матриці все ж менше 50 МПа, що дозволяє вважати прийнятним використання усіх раніше відомих розрахунків і теоретичних положень штампування-витягу, заснованих на ухваленні закону Амонтона. Для СПМ це, очевидно неприйнятно. У загальному випадку правильніше користуватися двома характеристиками тертя, а якщо в усіх зонах виконуватиметься закон Амонтона, то підстановкою того, що відповідає тиску значення $\tau_{тр}$ для притиску, не змінимо кінцевого результату.

Найбільш строгим випадком є пальмова олія. При тисках до 50 МПа виконується закон Амонтона (рис. 4), а в широкому діапазоні тисків від 50 до 170 МПа напругу тертя можна вважати постійною. Це дозволяє характеризувати умови тертя в двох діапазонах тисків двома різними характеристиками. Для інших мастильних матеріалів при тисках вище 50 МПа також не можна використати закон Амонтона. Величину напруги тертя навіть за відсутності «майданчика» плинності можна прийняти

або рівною напрузі на ній, або іншому середньому значенню, найближче відповідному фактичному також середньому значенню.

У роботі [2] розглядалася формула визначення загальної напруги втягування заготовки у матрицю:

$$\sigma_{заг} = \sigma_p + \sigma_{зг} + \sigma_{тр.ф} + \sigma_{тр.м}. \quad (4)$$

Було розглянуто питання і отримана формула напруги, яка викликана тертям між заготовлею, притиском і матрицею на плоскій його частині, тобто $\sigma_{тр.ф}$. Розглянемо наступну складову формули (4) $\sigma_{тр.м}$ – напруге тертя на закругленні матриці.

Напруга тертя в небезпечному перетині 1'-1' (рис. 6), тобто напруга, викликана тертям заготовки на закругленні матриці, визначається як:

$$\sigma_{тр.м} = \frac{T_{тр.закр.м}}{F_{1'-1'}}, \quad (5)$$

де $T_{тр.закр.м}$ – сила тертя на закругленні матриці, Н;
 $F_{1'-1'}$ – площа заготовки в перетині 1'-1', м².

Площа заготовки в перетині 1'-1' рівна:

$$F_{1'-1'} = 2 \cdot \pi \cdot R_{вн} \cdot s, \quad (6)$$

де s – товщина металу заготовки, м.

Сила тертя на закругленні матриці:

$$T_{тр.закр.м} = \tau_{тр.м} \cdot F_{тр.закр} \quad (7)$$

Площа, що треться, на закругленні $F_{тр.закр}$ визначатиметься завдовжки дуги кола на закругленні $\frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_m$, помноженою на довжину усього кола зігнутої поверхні по матриці $2 \cdot \pi \cdot R_{вн}$ (рис. 6). Тоді:

$$F_{тр.закр} = \frac{1}{4} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_m \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_{вн} = \pi^2 \cdot r_m \cdot R_{вн},$$

$$T_{тр.закр.м} = \tau_{тр.м} \cdot \pi^2 \cdot r_m \cdot R_{вн}. \quad (8)$$

Підставляючи формули (6) і (8) у вираження (5), отримаємо:

$$\sigma_{тр.м} = \tau_{тр.м} \frac{\pi^2 \cdot r_m \cdot R_{вн}}{2 \cdot \pi \cdot R_{вн} \cdot s} = \tau_{тр.м} \frac{\pi \cdot r_m}{2 \cdot s}. \quad (9)$$

З отриманої формули виходить, що на граничну деформацію при глибокому витягу впливає дія умов тертя на згині матриці, яке не підкоряється закону Амонтона і не може бути розрахована коректно, використовуючи коефіцієнт тертя $f_{тр}$. Пропонується для визначення граничної деформації на згині матриці використати в розрахунках

значення напруги тертя $\tau_{тр}$, про що було обґрунтовано вище.

Таким чином, на здатність матеріалу до витягу впливають у тому числі сумарна дія умов тертя, що виникають в двох різних режимах враховані коефіцієнтом тертя $f_{тр}$, викликане зусиллям притиску $Q_{пр}$ між заготівлею, притиском і площиною матриці [2] і напругою тертя $\tau_{тр}$ на згині матриці.

Була проведена інтервальна оцінка статистичних параметрів експерименту за визначенням залежності напруги тертя від тиску. Розглядався довірчий інтервал – це приблизний діапазон значень, який з високою мірою вірогідності включає усі ці результати [17, 18].

Сенс обчислення довірчого інтервалу полягає в побудові за даними вибірки такого інтервалу, щоб можна було стверджувати із заданою вірогідністю, що значення оцінюваного параметра знаходиться в цьому інтервалі.

Чим ширше довірчий інтервал для заданого рівня вірогідності (скажімо, 95%), тим нижче рівень «довіри» до вибірових оцінок, і навпаки. Широкий довірчий інтервал для вибірового середнього вказує на неточне відображення середній по сукупності. Звідси, чим вузьчий довірчий інтервал, тим краще.

При обробці результатів вимірів користувалися наступним порядком операцій:

1. Використовуване технологічне мастило – трансформаторна олія.
2. Тиск (машина тертя, вузол рис. 1) – 10 МПа.
3. Напряга тертя мінялася при кожному експерименті і заносилася в таблицю 3.

Таблиця 3

Напряга тертя при кожному експерименті

№ експ.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Напр.тер., τ	2,8	2,9	2,7	3,0	3,1	2,9	2,7	2,6	3,0	3,0	3,3	2,9	2,9	2,9	2,9

4. Варіаційний ряд цієї вибірки склали: 2,6; 2,7; 2,7; 2,8; 2,9; 2,9; 2,9; 2,9; 2,9; 2,9; 3,0; 3,0; 3,0; 3,1; 3,3.

5. Розмах вибірки склав $\omega = 3,3 \dots 2,6 = 0,7$.

6. Статистичний ряд вибірки заносили в таблицю 4.

Таблиця 4

Статистичний ряд вибірки експерименту

x_i	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,3
n_i	1	2	1	6	3	1	1

де x_i – результат експерименту,

n_i – частота цього результату.

7. Визначали вибірове середнє.
8. Визначали оцінку дисперсії.
9. Розраховували середнє квадратичне відхилення.
10. Розраховували відхилення середнього значення
11. Розраховували коефіцієнт варіації.

Довірчий інтервал для параметра x за результатами n спостережень, коли довірча вірогідність дорівнює $1 - \alpha$ (зазвичай 0,90 або 0,95 або 0,99) і в припущенні, що вибірка вимірів отримана з нормально розподіленої генеральної сукупності, знаходили за формулою:

$$\bar{x} - \frac{S}{\sqrt{n}} \cdot U_{1-\alpha/2} < x < \bar{x} + \frac{S}{\sqrt{n}} \cdot U_{1-\alpha/2} \quad (10)$$

Подальший статистичний аналіз для тисків 20, 30, ..., МПа і так далі зведемо в таблицю 5 для мас-

Таблиця 5

Статистичний аналіз залежності напруги тертя від тиску для різних мастил

Тиск, q, МПа	Розмах вибірки, w	Середнє значення напруги, \bar{x} , МПа	Дисперсія, S^2	Середнє квадратичне відхилення, S	Коефіцієнт варіації, V, %	Довірчий інтервал (довірча вероятністьравна 0,95), МПа	Ширина довірчого інтервалу, МПа
Трансформаторна олія							
10	0,7	2,9	0,07	0,26	8,9	2,76...3,04	0,28
20	0,4	4,8	0,025	0,16	3,3	4,71...4,89	0,18
30	0,4	6,4	0,019	0,14	2,2	6,33...6,47	0,14
50	0,3	11,0	0,016	0,13	1,2	10,93...11,07	0,14
70	0,4	17,1	0,016	0,13	0,7	17,03...17,17	0,14
100	0,5	25,0	0,04	0,2	0,8	24,93...25,07	0,14
130	0,3	26,5	0,004	0,065	0,2	26,46...26,54	0,08
150	0,4	33,0	0,008	0,09	0,2	32,95...33,05	0,1
Індустріальне 50							
10	0,6	0,9	0,103	0,32	35,5	0,72...1,08	0,36
20	0,5	1,5	0,072	0,27	18,0	1,35...1,65	0,30
30	0,6	3,1	0,070	0,26	8,4	3,95...3,25	0,30

Тиск, q, МПа	Розмах вибірки, w	Середнє значення напруги, \bar{x} , МПа	Дисперсія, S^2	Середнє квадратичне відхилення, S	Коефіцієнт варіації, V, %	Довірчий інтервал (довірча вероятність $\gamma=0,95$), МПа	Ширина довірчого інтервалу, МПа
50	0,4	5,1	0,021	0,14	2,7	5,02...5,18	0,16
70	0,4	12,0	0,027	0,16	1,3	11,91...12,09	0,18
100	0,5	15,3	0,021	0,14	0,9	15,22...15,38	0,16
130	0,4	16,1	0,021	0,14	0,9	16,02...16,18	0,16
150	0,4	30,0	0,017	0,13	0,4	29,93...30,07	0,14
Циліндрове 52							
10	0,5	0,4	0,098	0,31	77,5	0,23...0,57	0,34
20	0,5	0,9	0,081	0,28	31,1	0,75...1,05	0,3
30	0,4	2,1	0,076	0,28	13,3	1,95...2,25	0,3
50	0,4	4,1	0,035	0,19	4,6	4,00...4,20	0,20
70	0,4	11,1	0,027	0,16	1,4	11,01...11,19	0,18
100	0,5	13,9	0,023	0,15	1,1	13,82...13,98	0,16
130	0,4	15,1	0,019	0,14	0,9	15,02...15,18	0,16
150	0,4	23,0	0,018	0,13	0,6	22,93...23,07	0,14
200	0,4	26,9	0,016	0,13	0,5	26,83...26,97	0,14
Бавовняна олія							
10	0,5	1,1	0,120	0,35	31,8	0,90...1,30	0,4
20	0,5	2,0	0,092	0,30	15,0	1,80...2,20	0,4
30	0,5	3,7	0,085	0,29	7,8	3,55...3,85	0,3
50	0,4	5,4	0,071	0,27	5,0	5,25...5,55	0,3
70	0,4	13,0	0,060	0,24	1,8	12,85...13,15	0,3
85	0,4	17,9	0,049	0,22	1,2	17,80...18,00	0,2
100	0,5	20,3	0,031	0,18	0,9	20,20...20,40	0,2
150	0,4	21,0	0,027	0,16	0,8	20,9...21,1	0,2
180	0,5	21,2	0,020	0,14	0,7	21,15...21,25	0,1
Пальмова олія							
10	0,5	2,1	0,100	0,32	15,2	1,92...2,28	0,36
20	0,5	3,8	0,083	0,29	7,6	3,64...3,96	0,32
30	0,4	4,8	0,076	0,28	5,8	4,65...4,95	0,30
50	0,5	9,7	0,049	0,22	2,3	9,58...9,82	0,24
70	0,4	11,0	0,033	0,18	1,6	10,9...11,1	0,2
100	0,4	11,9	0,027	0,16	1,3	11,81...11,99	0,18
130	0,5	12,5	0,20	0,15	1,2	12,42...12,58	0,16
175	0,4	12,7	0,017	0,13	1,0	12,63...12,77	0,14
Графіт							
10	0,5	1,5	0,113	0,34	22,6	1,3...1,7	0,4
20	0,5	3,0	0,082	0,29	9,7	2,8...3,2	0,4
30	0,4	4,4	0,064	0,25	5,7	4,3...4,5	0,2
50	0,4	7,0	0,052	0,23	3,3	6,9...7,1	0,2
70	0,5	8,8	0,038	0,19	2,2	8,7...8,9	0,2
100	0,4	9,7	0,021	0,14	1,4	9,6...9,8	0,2
130	0,4	10,0	0,018	0,13	1,3	9,9...10,1	0,2
150	0,4	11,3	0,020	0,14	1,2	11,2...11,4	0,2
Дисульфід молібдену							
10	0,6	1,8	0,109	0,33	18,3	1,6...2,0	0,4
20	0,5	3,6	0,092	0,3	8,3	3,4...3,8	0,4
30	0,4	5,5	0,071	0,27	4,9	5,4...5,6	0,2
50	0,4	7,9	0,058	0,24	3,0	7,8...8,0	0,2
70	0,5	8,4	0,041	0,2	2,3	8,3...8,5	0,2
100	0,4	8,7	0,025	0,16	1,8	8,6...8,8	0,2
130	0,4	9,0	0,021	0,14	1,6	8,9...9,1	0,2
150	0,4	9,5	0,020	0,14	1,5	9,4...9,6	0,2

тил: вапор, И-50А, пальмова олія, графіт, бавовняна олія і дисульфід молібдену.

Висновки. Встановлено, що на граничну деформацію при глибокому витягу тонколистового прокату впливає дія умов тертя на згині матриці. Тому, для її оцінки введена величина напруги тертя, яка дозволяє отримувати точніший розрахунок характеристики штампування. Визначено, що в діапазоні тисків, що мають місце при штампуванні листового металу, взаємозв'язок між напругою тертя ($\tau_{тр}$) і тиском (q) не може бути описаний однією функцією. Для тисків нижче

50 МПа ця залежність підкоряється закону Амонтона. При більших тисках лінійна залежність порушується. У зв'язку з цим, для оцінки фрикційної взаємодії при штампуванні запропоновано використати дві характеристики тертя: при малих тисках (в притиску) коефіцієнт тертя ($f_{тр}$) і при великих тисках (на згині матриці) напруга тертя ($\tau_{тр}$), яка є фізичною характеристикою дії мастила, що являється, в заданому діапазоні тисків. Такий облік доцільний при штампуванні звичайних сталей і обов'язковий при штампуванні сталей підвищеної міцності.

Список літератури:

1. Рудасьов В.Б., Якубовський О.М., Головіна О.В. Сучасні тенденції застосування сталей підвищеної міцності в автомобілебудуванні. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: технічні науки*. 2022. Том 33 (72) № 1. С. 12–18.
2. Рудасьов В.Б., Якубовський О.М., Головіна О.В. Зусилля притиску при штампуванні тонколистового прокату із сталей підвищеної міцності. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: технічні науки*. 2023. Том 34 (73) № 1. С. 9–17.
3. Hyunok Kim, Ji Hyun Sung, Rajesh Sivakumar, Taylan Altan. Evaluation of stamping lubricants using the deep drawing test. *International Journal of Machine Tools & Manufacture (International Journal of Machine Tools & Manufacture Design, Research and Application)*. 2007. №47(14). Pages 2120-2132.
4. Kim H., Altan T., Yan Q. Evaluation of stamping lubricants in forming advanced high strength steel (AHSS) using deep drawing and ironing tests. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. № 8. Pages 4122–4133.
5. Lovell M., Higgs C.F., Deshmukh P., Mobley A. Increasing formability in sheet metal stamping operations using environmentally friendly. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006. Volume 177, Issues 1–3. Pages 87–90.
6. Tribologia. Tribolotechnika / Redakcia naukova M.Szczerek, M. Wisniewski. Radom: Polckie Towarzystwo Tribologiczne, 2000. 728 s.
7. Закалов О.В., Закалов І.О. Основи тертя і зношування в машинах: навч. посібник. Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. 322 с.
8. Мільман Ю.В., Грінкевич К.Е., Мордель Л.В., Козирев Д.В., Ткаченко І.В., Купрін В.В. Особливості механічних та трибологічних властивостей інтерметалідів на основі алюмінію, нікелю та титану за умов локального навантаження. *Електронна мікроскопія та міцність матеріалів: збірник наук. пр.* Київ: ПІМ НАН України, 2013. Вип. 19. С. 86–95.
9. Naizabekov A., Samsonov D., Krivtsova O., Lezhnev S., Talmazan V., Arbutov A. Comparative evaluation of technologic lubricants. *METAL 2013 - 22nd International Conference on Metallurgy and Materials*. (Brno, 15th – 17th May 2013). Brno, 2013. С. 403 – 407.
10. Максименко О. П., Лясота С.М., Романюк Р.Я. Теорія процесів прокатного, трубного, ковальсько-штампувального та волочильного виробництв: навч. посібник. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2011. 264 с.
11. Убизький М.М., Кулик О.В., Фесенко А.Г., Шевчук Д.І. Холодне листове штампування: навч. посібник. Д.: РВВ ДНУ, 2008. 124 с.
12. Данченко В.М., Гришкович В.О., Головка О.М. Теорія процесів обробки металів тиском: підручник. Дніпропетровськ: “Пороги”, 2008. 370 с.
13. Savuliak V. Modelling of the process of regular profiles stamping from sheet. *Buletinul institutului politehnic din Iasi*. 2011. Tomul LVII (LXI). Fasc. 4. P. 199 – 208.
14. Тітов В. А., Злочевська Н. К., Качан О. Я. Технологічна механіка забезпечення міцності та якості деталей пластичним деформуванням. Київ: КВІЦ, 2016. 176 с.
15. Keeler Stuart P. Understanding Sheet Metal Formability. *Machinery and Production Engineering*. 1969. 322 p.
16. Термінологічний словник-довідник з трибології, надійності та нанотехнологій / Івченко Л. Й., Черкун В. Ю., Кубіч В. І., Черкун В. В.; за заг. ред. Л. Й. Івченка. Запоріжжя: ЗНТУ, 2016. 116 с.
17. Сусь Б.А., Лад А.І. Фізичні вимірювання і обробка їх результатів: навчальний посібник для самостійної роботи курсантів і студентів. Київ: ВІТІ, 2017. 39 с.
18. Барковський В. В., Н. В. Барковська, О. К. Лопатін. Теорія ймовірностей та математична статистика: навчальний посібник. К.: ЦНЛ, 2006. 424 с.
19. Бевз Г.П. Довідник з математики. Київ: Рад школа, 1981. 262 с.

Rudasov V.B., Holovina O.V., Yakubovskiy O.M., Moskalenko G.V. ANALYSIS OF CONDITIONS AND FRICTION STRESSES DURING STAMPING OF THIN SHEET HIGH-STRENGTH STEEL ROLLING

The article discusses technological measures unrelated to changes in the shape of the blanks and tools, aimed at improving the stamping of high-strength steels used for manufacturing automotive body parts. The analysis focuses on the stress-strain state of the blanks, considering variations in friction conditions using technological lubricating materials during the sheet stamping process. Mineral oils (transformer and industrial oils), fats (cottonseed and palm oils), and dry lubricating materials such as graphite and molybdenum disulfide were investigated as lubricating materials. The component of the formula determining the total drawing stress of the blank into the die is discussed, specifically the stress formula induced by friction between the blank, pressure pad, and die on its flat portion. It is established that friction conditions in the flange of the blank during the stamping-drawing operation, between the pressure pad and die, and on the curved die are not identical and cannot be described by a single function. Therefore, in the theory of determining the limiting drawing ratio of thin sheet metal to assess friction conditions on the die curvature, the friction stress magnitude on the curved die, denoted as $\tau_{mp.m.}$, is introduced, allowing for a more accurate calculation of stamping characteristics. An experimentally selected method for measuring friction forces, based on the principle of capturing a stationary specimen with a moving instrument with a force proportional to the friction force, was employed. Through interval estimation of the statistical parameters of the experiment, research was conducted on the relationship between friction stress and pressure in the region of relatively low loads, characteristic of stamping using technological lubricating materials. Based on the research results, it is suggested that for stamping both regular steels and high-strength steels, two friction characteristics should be used: the friction coefficient under low pressures and the friction stress under high pressures on the die.

Key words: high-strength sheet steels, stress-strain state, friction stress, friction forces, technological lubricants for stamping.

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.311.13

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/03>

Бунько В.Я.

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

Дарморіс П.М.

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

АНАЛІЗ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ ПОБУДОВИ ОСЦИЛОГРАМ РОБОТИ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ТЕРМІНАЛУ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ, АВТОМАТИКИ ТА ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ

У статті розглянуто питання функціонування мікропроцесорного пристрою релейного захисту та автоматизації енергосистем на основі РЗЛ-05М з використанням основних технічних можливостей програмного середовища, яке реалізується в даному терміналі для забезпечення автоматизації та диспетчеризації енергетичних об'єктів.

Основним питанням, яке розглядається в даній статті є аналіз побудови осцилограм роботи мікропроцесорного терміналу, а також реалізація програмного середовища «Монітор-2» для забезпечення керування системою енергопостачання на базі пристрою РЗЛ-05М. Дане програмне середовище дозволяє вирішувати інженерно-технічні завдання щодо автоматизації, релейного захисту та диспетчеризації енергетичних станцій, підстанцій та ліній електропередач високої напруги, зокрема: зчитувати інформацію про пристрій; переглядати величини, які вимірюються у первинних чи вторинних величинах; переглядати стан дискретних входів, стан контактів реле, стан світлодіодних індикаторів (СДІ), віртуальних виходів пристрою; проводити дистанційне керування пристроєм (вмикання, вимикання, квитування, пуск осцилограм тощо) за командами з ПК; переглядати події в реальному часі; переглядати та змінювати параметри пристрою: пароль, адреси та швидкості портів, відображення вимірювань, перемикання групи уставок, коефіцієнти трансформації трансформаторів струму (ТС) та напруги (ТН) та ін.; переглядати та змінювати налаштування мережевих інтерфейсів RS-485 та USB; переглядати та змінювати уставки функцій захисту, автоматики та контролю, а також режими роботи дискретних входів (ДВ), реле та СДІ; зберігати значення уставок у файл і завантажувати їх з файлу в пристрій; зберігати таблиці налаштувань параметрів та уставок у форматі Excel; переглядати журнал подій пристрою, налаштовувати та зберігати його у форматі Excel; зчитувати з пристрою аварійні та користувальницькі осцилограми, налаштовувати та зберігати їх на ПК у форматі COMTRADE; переглядати, зберігати та роздруковувати журнал адрес MODBUS пристрою та інше.

Ключові слова: мікропроцесорний пристрій, релейний захист, автоматика, мікропроцесорний термінал, енергосистема, електричні станції, підстанції, диспетчеризація.

Постановка проблеми. Найважливішою умовою в період воєнного стану, післявоєнної відбудови, а також подальшого соціально-економічного розвитку країни є стабільне і постійне удосконалення електроенергетичної сфери, що забезпечує надійну роботу промисловості, транспорту та інших галузей економіки держави [1].

Конкретні завдання в паливно-енергетичному, електротехнічному, машинобудівному і транспортному комплексах висуюють в даний час на перше

місце проблему забезпечення необхідної надійності, безаварійності та ефективності складних технічних об'єктів та їх систем керування. До таких об'єктів відносяться сучасні потужні електроенергетичні системи та їх елементи (наприклад, електричні станції, лінії електропередачі, електричні розподільні системи потужних промислових підприємств, автономні електроенергетичні, перетворювальні, електротехнічні і електромеханічні установки і системи управління ними), що вклю-

чають пристрої релейного захисту і протиаварійної автоматики, диспетчеризації, а також комплектні розподільні пристрої на основі сучасних мікропроцесорних терміналів і пристроїв [1, 2].

Останнім часом у зв'язку з появою мікропроцесорів (МП) намітилася тенденція до широкого використання їх в електропобутовій техніці (ЕПТ) і електроапаратобудуванні, до безпосереднього впровадження в пристрої управління електричними апаратами, техніку релейного захисту, систем протиаварійної автоматики, в автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУТП) виробництва, випробування і дослідження елементів систем енергопостачання тощо. Це викликано появою нових підвищених і різноманітних вимог до систем автоматизації управління електроенергетичними об'єктами [1]. У зв'язку з цим традиційні системи управління і регулювання виконані на аналогових елементах, опинилися не в змозі конкурувати з цифровими пристроями, в яких використовуються мікропроцесори, завдяки яким на сьогоднішній день впроваджуються мікропроцесорні пристрої для автоматизації, релейного захисту та диспетчеризації системи енергопостачання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідженнями елементів релейного захисту та автоматизації та бази мікропроцесорних пристроїв займалися такі вчені: Яндутьський С.О., Кутін В.М., Кутіна М.В., Ілюхін М.О., Гребченко М.В., Нікіфоров А.П., Сокол Є.І., Сендерович Г.А., Гриб О.Г. та інші. Значний внесок у розвиток МП систем РЗА внесли: ІЕД НАН України (м. Київ) – Стогній Б.С., Кириленко О.В., Сопель М.Ф. та інші науковці, які займалися питаннями релейного захисту й автоматики електроенергетичних систем. Досить вагомі результати з цього приводу були отримані в Київському, Львівському і Ризькому політехнічних інститутах [5, 10]. На сьогоднішній день роботи з розробки, проектування, підвищення ефективності, функціонування і впровадження МП РЗА ведуться вітчизняними розробниками: ВО «Київприлад», підприємство «Хартрон-Інкор» [5], ТОВ «Schneider Electric Україна», ТОВ «Науково-виробниче підприємство «РЕЛСІС»», ТОВ «RZA systemz» та інші.

Мета роботи – дослідити функціонування мікропроцесорного пристрою релейного захисту та автоматизації енергосистем на основі РЗЛ-05М з використанням основних технічних можливостей програмного середовища.

Виклад основного матеріалу. Дане програмне середовище «Монітор-2» дозволяє

керувати пристроями релейного захисту серій РЗЛ-05, РЗЛ-06 за допомогою персонального комп'ютера в лабораторних умовах або з диспетчерського пункту на виробництві [3, 4]. В даному випадку для зв'язку мікропроцесорних пристроїв релейного захисту і автоматики із ПК використовується протокол зв'язку MODBUS-RTU [6, 7].

Однією із основних функцій даного терміналу являється побудова та перегляд осцилограм для аналізу роботи пристрою в програмному середовищі «Монітор-2», а також побудови кругових діаграм напруги трифазної системи.

Після завантаження осцилограми з будь-якого джерела, чи це безпосередньо пристрій чи з файлу ПК, відкриється нова панель графічного відображення осцилограми. Назва панелі залежить від часу створення осцилограми [8, 9].

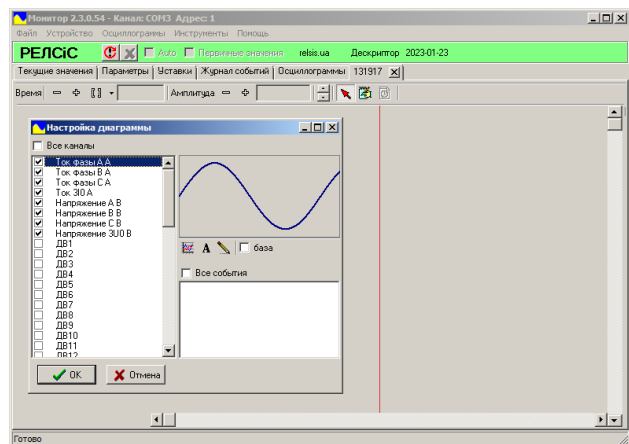


Рис. 1. Вікно налаштування каналів «Налаштування діаграми»

Вибір подій, що відображаються на осцилограмі (якщо здійснено завантаження осцилограм разом з подіями) здійснюється в правій нижній частині вікна «Налаштування діаграми». У цьому списку будуть записані всі події, котрі мали місце під час запису поточної осцилограми [8, 9].

Для того, щоб події з'явилися на осцилограмі, необхідно виставити мітки біля необхідних назв подій. За допомогою позначки біля «Всі події» позначаються усі доступні події [8, 9].

Якщо осцилограма вже відкривалася раніше та збережена на ПК, то налаштування каналів збережуться. Після вибору необхідних каналів та їх налаштування панель графічного відображення набуде вигляду, представленого на рис. 2 [8, 9].

При першому відкритті на панелі відображається вся довжина ліченої осцилограми та всі вибрані канали.

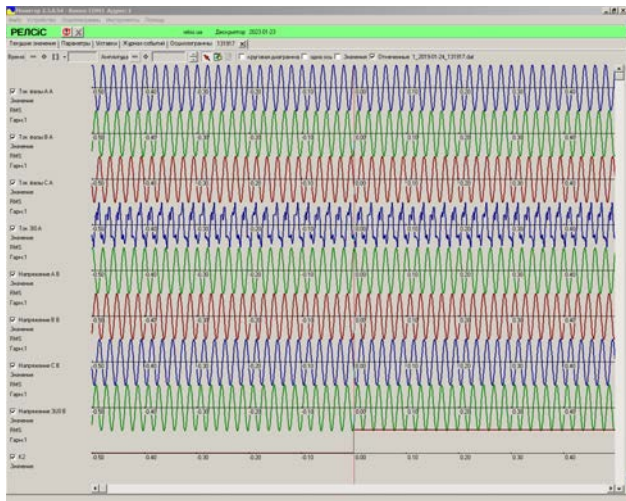


Рис. 2. Панель відображення осцилограм

Для зміни масштабування амплітуди на панелі інструментів у блоці «Амплітуда» використовуються кнопки «Зменшити» та «Збільшити».

Дане вікно дозволяє змінювати масштабування амплітуди як для всіх каналів, так і для конкретного випадку. Для масштабування конкретного каналу необхідно вибрати його у лівій частині вікна осцилограми, а потім використовувати кнопки «Зменшити» та «Збільшити». Вибраний канал позначається блакитним кольором (рис. 3) [8, 9].

Також у блоці «Амплітуда» можна змінювати кількість осей каналів осцилограми, що одночасно відображаються на панелі, змінюючи відстань між ними.

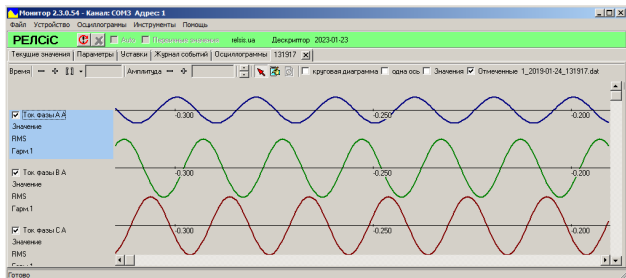


Рис. 3. Масштабування конкретного каналу з амплітуди

Для спрощення аналізу осцилограм можливе встановлення до двох вимірювальних ліній за часом та амплітудою. Для активації режиму встановлення ліній необхідно натиснути кнопку «Лінійки» на панелі інструментів [8, 9].

Для встановлення вимірювальної лінії за часом необхідно натиснути «ЛКМ» на потрібне місце на осцилограмі. Після цього тут з'явиться лінія фіолетового кольору. На рис. 4 цю лінію встановлено на момент – 0,050 с.

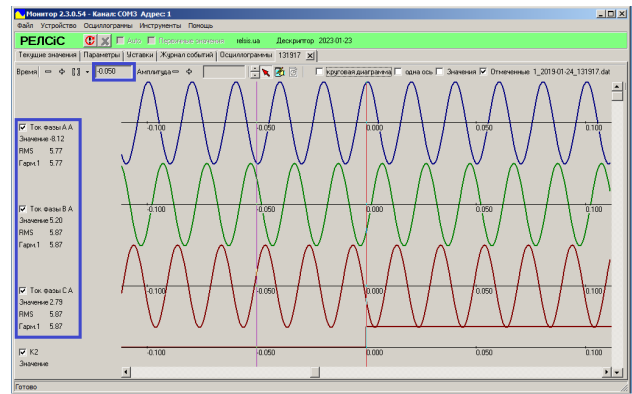


Рис. 4. Лінії вимірювання за часом

Встановивши лінію, користувач чи диспетчер може вимірювати точний момент часу (червоний квадрат на рис. 4), значення амплітуди та значення першої гармоніки (синій квадрат, рис. 4) для кожного з каналів вимірювання в даний момент часу [8, 9].

Для переміщення лінії необхідно навести курсор на лінію та утримуючи її натиснутою «ЛКМ», вибрати нове місце.

Встановлення другої лінії проводиться аналогічно, але віконце часу показуватиме значення часу між лініями (червоний квадрат, рис. 5) і будуть доступні деякі функції [8, 9].

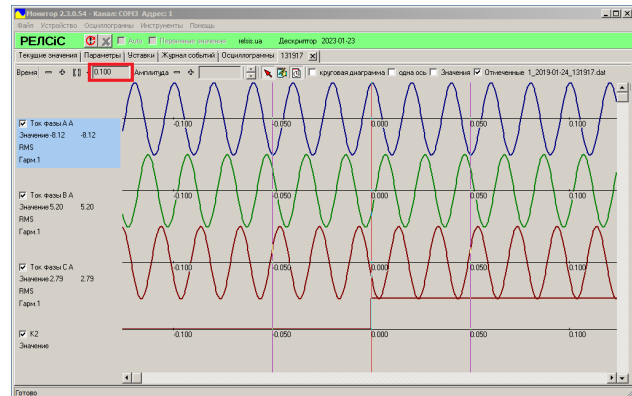


Рис. 5. Дві лінії вимірювання за часом

Для зручності оцінки величин під час використання вимірювальних ліній передбачено спеціальне вікно «Значення» (рис. 6). Для виклику вікна необхідно виставити позначку біля «Значення» на панелі інструментів. Дане вікно дозволяє переглядати характеристики осцилограми використовуючи вимірювальну лінію, але вже у зручнішому вигляді та для всіх вибраних каналів одночасно [8, 9].

Для створення кругової діаграми необхідно виставити мітку біля «Кругова діаграма» на панелі інструментів. Після цього у правій частині

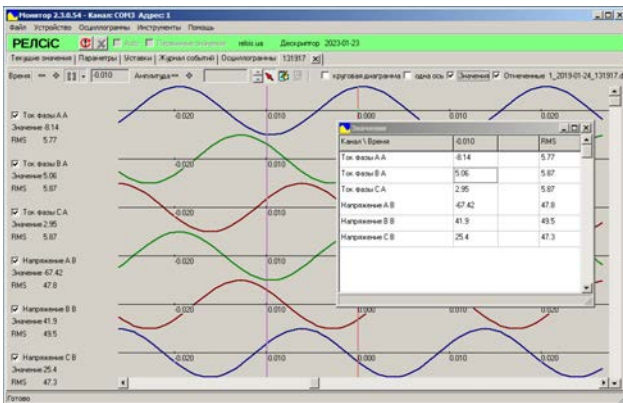


Рис. 6. Вікно «Значення»

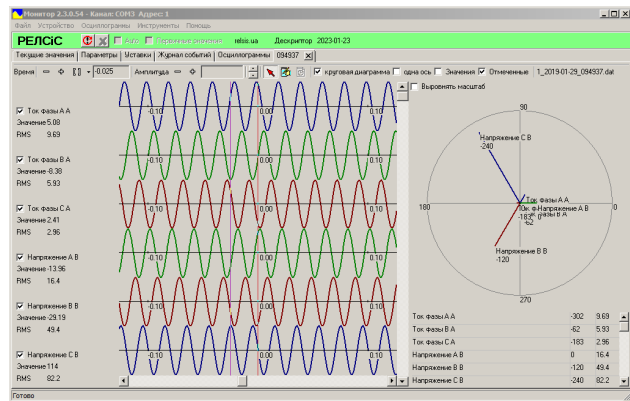


Рис. 7. Кругова діаграма

панелі осцилограми відобразиться вікно кругової діаграми для нульового моменту (рис. 7). Розміри кругової діаграми можна змінити, змінюючи розмір вікна (розтягуючи його вздовж тимчасових осей) [8, 9].

Кругова діаграма показує чинне значення та фазу каналів вимірювань у конкретний момент часу. Вибір часу здійснюється вимірювальною лінією.

За промовчанням для відображення на діаграмі напруги та струмів використовується загальний масштаб. Для вирівнювання масштабів, при якому відображаються лише фази (ігнорується значення амплітуд), необхідно виставити мітку біля «Вирівняти масштаб» (рис. 8) [8, 9].

Після всіх опцій осцилограму можна зберегти у вигляді файлу. Для цього необхідно натиснути на пункт меню Файл -> Зберегти як і вибрати ім'я, шлях файлу в стандартному вікні збереження. Для відкриття файлу осцилограми необхідно вибрати пункт меню «Осцилограми» -> «Відкрити».

Також налаштовану осцилограму можна роздрукувати або перетворити на pdf-файл (якщо користувач має віртуальний принтер). Для цього необхідно вибрати пункт меню «Осцилограми» -> «Друк» або натиснути комбінацію клавіш «Ctrl + P». Після цього відкриється стандартне вікно налаштування друку, в якому можна вибрати принтер і почати друк, натиснувши кнопку ОК.

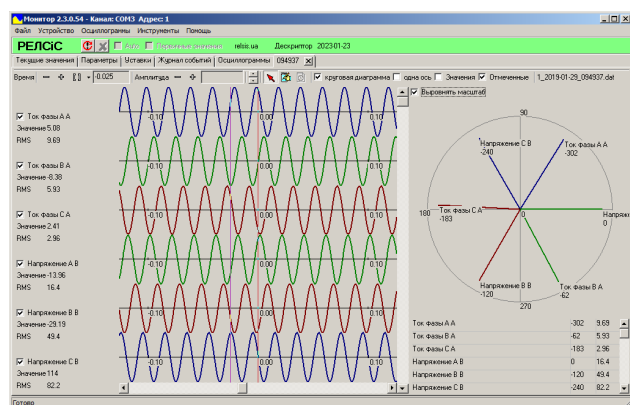


Рис. 8. Кругова діаграма лише з урахуванням фаз

Висновки. Отже, як видно із панелі у програмному середовищі «Монітор-2» є ряд основних можливостей, які дозволяють керувати на верхньому рівні мікропроцесорним терміналом, зокрема: «Поточні значення», «Параметри», «Уставки», «Журнал подій», «Осцилограми», «Зовнішня логіка» та «Звіт з подій».

В даній статті розглянуто цілий спектр побудови осцилограм роботи мікропроцесорного пристрою РЗЛ-05, за допомогою яких можна аналізувати процеси, що відбуваються в системі релейного захисту, автоматизації та диспетчеризації електроенергетичних об'єктів.

Список літератури:

1. Гришук Ю.С. Мікропроцесорні пристрої: Навчальний посібник. Х.: НТУ «ХП», 2007. 280 с.
2. Кутін В. М., Кутіна М. В., Ілюхін М. О. Засоби діагностування релейного захисту і автоматики електроенергетичних систем. Вінниця: ВНТУ, 2013. 117 с.
3. Бунько В.Я., Дарморіс П.М. Дослідження інтелектуального терміналу для релейного захисту та автоматизації систем. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова* № 1 (490) / 2023. С. 135–142.
4. Бунько В. Я. Обґрунтування та аналіз роботи мікропроцесорних терміналів для релейного захисту і телеуправління елементів енергосистеми. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства, Вып. 203 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*. 2019. С. 19–20.

5. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем [Електронне видання]: навч. посіб. / О.С. Яндутьський, О.О. Дмитренко; під загальною редакцією д.т.н. О.С. Яндутьського. К. : НТУУ «КПІ», 2016. 102 с.
6. Бунько В.Я. Аналіз методів та засобів підвищення надійності елементів релейного захисту / В.Я. Бунько // Технологічний аудит і резерви виробництва. 2015. № 3(1). С. 26–30. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tatrv_2015_3%281%29__7/
7. Релейний захист і автоматика розподільних електричних мереж. Частина 1: Навч. посібник / М.В.Гребченко, А.П.Нікіфоров, В.Я.Бунько. – К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2019. 314 с.
8. Пристрої серії РЗЛ-05 з вільно програмованою логікою. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://reلسis.ua/ua/products/relay-protection-automation/rzl-05/rzl-05-spl> (дата звернення 10.01.2024)
9. Пристрій захисту та контролю для підстанцій та приєднань 6-35 кВ РЗЛ-05.М [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://reلسis.ua/ua/products/relay-protection-automation/rzl-05/rzl-05m>. (дата звернення 25.12.2023)
10. Релейний захист електроенергетичних систем [Електронний ресурс]: підручник / Є. І. Сокол, Г. А. Сендерович, О. Г. Гриб, А. О. Запорожець, І. О. Самойленко, В. В. Скопенко, І. Т. Карплюк, С. В. Швець, М. В. Черкашенко, О. Ю. Заковортний, Н. С. Захаренко, Н. В. Рудевич, Ю. Ф. Тесик, С. Ю. Пронзалева, В. Є. Кривонос, І. С. Ярова. Харків: ФОП Бровін О. В., 2020. 306 с.

Bunko V.Ya., Darmoris P.M. ANALYSIS AND IMPLEMENTATION OF THE CONSTRUCTION OF OSCILLOGRAMS OF THE MICROPROCESSOR TERMINAL OF RELAY PROTECTION, AUTOMATICS AND DISPATCHING

The article deals with the functioning of a microprocessor device for relay protection and automation of energy systems based on RZL-05M using the main technical capabilities of the software environment, which is implemented in this terminal to ensure automation and dispatching of energy facilities.

The main issue considered in this article is the analysis of the construction of oscillograms of the microprocessor terminal, as well as the implementation of the "Monitor-2" software environment to ensure control of the power supply system based on the RZL-05M device. This software environment allows you to solve engineering and technical tasks related to automation, relay protection and dispatching of power stations, substations and high-voltage power transmission lines, in particular: read information about the device; view quantities that are measured in primary or secondary quantities; view the status of discrete inputs, the status of relay contacts, the status of LED indicators, virtual outputs of the device; carry out remote control of the device (turning on, turning off, acknowledging, starting oscillograms, etc.) according to commands from the PC; view events in real time; view and change device parameters: password, port addresses and speeds, display of measurements, switch group of settings, transformation coefficients of current transformers and voltage transformers, etc.; view and change settings of RS-485 and USB network interfaces; view and change settings of protection, automation and control functions, as well as operating modes of discrete inputs, relays and LED indicators; save setting values to a file and download them from the file to the device; save tables of parameter settings and settings in Excel format; view the event log of the device, configure and save it in Excel format; read emergency and user oscillograms from the device, configure and save them on a PC in COMTRADE format; view, save and print the device's MODBUS address log and more.

Key words: *microprocessor device, relay protection, automation, microprocessor terminal, power system, electric stations, substations, dispatching.*

УДК 621.314.57

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/04>**Голощанов С.С.**

Херсонська державна морська академія

Колебанов О.К.

Херсонська державна морська академія

Іванов А.А.

Херсонська державна морська академія

ІННОВАЦІЙНИЙ МЕТОД РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Асинхронні машини в основному використовуються як двигуни через їх підвищену надійність і просту конструкцію. Вони знаходять широке застосування в різних галузях промисловості і є основними споживачами електроенергії в морській промисловості. Незважаючи на численні переваги, асинхронні машини мають помітний недолік – погане регулювання швидкості. Серед методів регулювання швидкості, таких як зміна кількості пар полюсів, введення опору в ланцюг ротора, регулювання напруги живлення або зміна частоти мережі електроживлення, метод регулювання частоти з проміжним перетворенням напруги трифазного кола є на даний момент вважається найбільш прийнятним. Ця перевага зумовлена сучасною силовою електронною інфраструктурою, яка перетворює напругу в постійний струм і згодом формує напругу змінної частоти за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Хоча цей метод дозволяє отримати змінну напругу з потрібною частотою та синусоїдальною формою сигналу, він пов'язаний зі значними втратами на перемикання в комутаторах інвертора. Це зумовлює необхідність використання складних систем рідинного охолодження. Однак ці втрати можна значно зменшити, якщо перемикачі інвертора генеруватимуть напругу прямокутної форми з потрібною частотою. Потім ця напруга використовується для живлення двигуна через запропонований перетворювач, який нейтралізує вищі гармоніки шляхом придушення третьої, п'ятої, сьомої та кратних їм гармонік. Третя гармоніка пригнічується трифазною обмоткою, яка служить виходом пристрою і з'єднана в трипроменево зірку. П'ята гармоніка пригнічується п'ятифазною обмоткою, що живиться від інвертора та з'єднана у конфігурацію п'ятипроменевої зірки, тоді як сьома гармоніка пригнічується семифазною обмоткою, з'єднаною у правильну короткозамкнений семикутник. Як п'ятифазна, так і семифазна обмотки перетворювача отримані з сегментів трифазних обмоток за допомогою зигзагоподібного з'єднання. Також наведено розрахунок складових п'яти- та семифазної обмоток із частин трифазної обмотки. Додатково включено аналіз втрат у семифазній обмотці відносно первинних втрат у трифазній обмотці.

Ключові слова: фаза, гармоніки, обмотка, перетворювач, втрати, асинхронний двигун.

Постановка проблеми. Трифазний асинхронний двигун (АД) в даний час є основним типом електродвигунів у промисловості і на судах морського флоту. Широке застосування трифазні АД отримали завдяки простоті пристрою, зручності обслуговування та високій надійності в експлуатації.

Застосування асинхронного приводу в підйомних судових механізмах, насосах і вентиляторах з регульованою продуктивністю передбачає плавне регулювання швидкості в широких межах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Один із відомих способів плавного регулювання швидкості АД – введенням опору в ланцюг ротора [1, с. 345] – має незадовільні енергетичні характеристики і не може бути рекомендований для

тривалого режиму роботи. Крім того, він можливий тільки для двигуна з фазним ротором, що здорожує двигун та ускладнює його експлуатацію. Регулювання швидкості обертання зміною величини напруги живлення може застосовано тільки для двигунів з м'якою механічною характеристикою (АД з масивним феромагнітним ротором) і не може бути використане для АД з короткозамкненою клітиною через вузький діапазон регулювання [1, с. 343].

В даний час, в основному, застосовують частотне регулювання – найбільш плавний та економічний спосіб регулювання швидкості короткозамкнених АД, що забезпечує широкий діапазон регулювання (до 12:1 і вище) за досить жорстких

механічних характеристик [1, с. 340]. Однак здійснення даного способу регулювання вимагає наявності спеціальних перетворювачів частоти, тип яких визначає схему частотного управління АТ. На судах застосовуються головним чином напівпровідникові перетворювачі, що формують напругу заданої частоти з джерела постійного струму – інвертори.

Відомо спосіб одержання симетричної трифазної напруги від джерела постійного струму за допомогою трифазного мостового інвертора [2, с. 5]. При цьому комутація перемикаючих ключів може бути здійснена кількома способами.

Перший з них – найбільш простий – формування трифазної напруги прямокутної форми. Подібний режим сприятливо позначається на величині комутаційних втрат у перемикаючих ключах інвертора – перемикання відбувається тільки два рази за півперіода. Однак прямокутна форма напруги містить увесь спектр непарних гармонік. Наявність же вищих гармонійних, особливо третьої, п'ятої й сьомої, суттєво спотворюють форму вихідної напруги відносно синусоїдальної і роблять її непридатною для живлення більшості споживачів.

Другий спосіб – використання частотних фільтрів, настроєних на відповідні гармоніки. [3, с. 118]. Однак при їх застосуванні форма вихідної напруги буде також залежати від величини й характеру навантаження. Загальним же недоліком фільтрів є їхня велика встановлена потужність, а отже, великі габаритні розміри й маса. Крім того, ступінь придушення гармонік залежить від характеристики фільтра й ніколи не буває 100 процентною.

Відомо також векторний спосіб синтезування синусоїдальної напруги, який полягає в тому, що вихідна напруга перетворювача формується з вихідних напруг кількох інверторів, що мають відповідні фазу й частоту й включених послідовно на стороні змінного струму. [3, с. 163]. При такому способі принципово можна одержати на виході синусоїдальну напругу з будь-якою наперед заданою точністю при різних варіантах з'єднання вихідних ланцюгів інверторів. Однак, щоб реально досягтися вихідної напруги з формою, близькою до синусоїдальної, потрібна дуже велика кількість дискретизацій рівнів вихідних інверторів, що, природно, складно й дорого.

Практично чистий синусоїдальний сигнал можна одержати за допомогою інвертора, вихідний сигнал якого формується способом широтно-імпульсної модуляції. [3, с. 134]. Однак

цей спосіб має дуже великий рівень комутаційних втрат – приблизно на порядок більше, ніж при формуванні вихідної прямокутної напруги, що приводить до дуже трудомістким і складним (в основному, рідинним) системам охолодження ключів інвертора.

Мета статті полягає в розрахунку і аналізі роботи трифазного перетворювача прямокутної напруги в синусоїдальну на базі багатообмоткового трифазного трансформатора.

Виклад основного матеріалу. У запропонованому рішенні в одному перетворювачі одночасно нейтралізуються третя, п'ята, сьома і кратні їм гармоніки.

Це досягається тим, що вихідна постійна напруга інвертором перетворюється в змінну прямокутну, третя гармоніка якої нейтралізується системою обмоток, включених у трипроменеву зірку, п'ята гармоніка нейтралізується обмотками, включеними в п'ятипроменеву зірку, а сьома – обмотками, включеними в правильний семикутник, замкнений накоротко [4].

При цьому вихід перетворювача передбачається трифазним, а вхід – п'ятифазний, у зв'язку із чим інвертор необхідно виконати п'ятифазним. Оскільки n -фазна система не містить гармонік, кратних n , у вихідній кривій перетворювача будуть відсутні 3-я, 5-я й кратні їм гармоніки. Сьома й кратні їй гармоніки виключаються за допомогою додаткової семифазної обмотки, з'єднаної в правильний замкнений семикутник. Крім того, у п'ятифазному інверторі рівень комутаційних втрат у перемикаючому ключі інвертора в 5/3 рази нижче, чим у прототипі й на порядок нижче, ніж при широтно-імпульсній модуляції. Схему пристрою представлено на рис. 1.

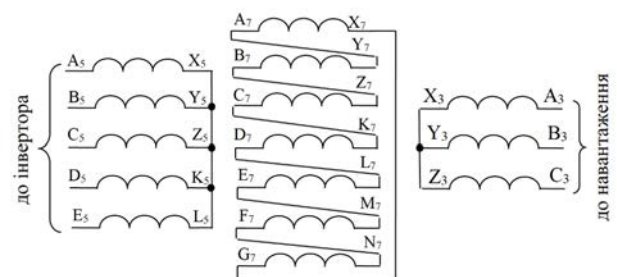


Рис. 1. Схема перетворювача

Нейтралізація зазначених гармонік здійснюється за допомогою багатообмоткового трифазного трансформатора, п'яти- і семифазні обмотки якого можна одержати способом з'єднання обмоток зигзаг [1, с. 153].

Нехай вихідна трифазна зірка представлена на рис. 2 у вигляді векторів A_3, B_3, C_3 , зсунутих на 120° і нехай усі вихідні вектори рівні 1, тобто

$$A_3 = B_3 = C_3 = 1.$$

В комплексній формі запису

$$A_3 = 1, \quad B_3 = e^{-j120^\circ} = -0,5 - j0,866, \\ C_3 = e^{j120^\circ} = -0,5 + j0,866.$$

У п'ятифазній зірці кут зсуву фаз $\frac{360}{5} = 72^\circ$ і нехай усі вектори, що одержуються, також рівні 1, тобто $A_5 = B_5 = C_5 = D_5 = E_5 = 1$.

Тоді в комплексній формі запису

$$A_5 = 1, \quad B_5 = e^{-j72^\circ} = 0,309 - j0,951 \\ , \quad C_5 = e^{-j144^\circ} = -0,809 - j0,858, \\ D_5 = e^{j144^\circ} = -0,809 + j0,858, \quad E_5 = e^{j72^\circ} = 0,309 + j0,951.$$

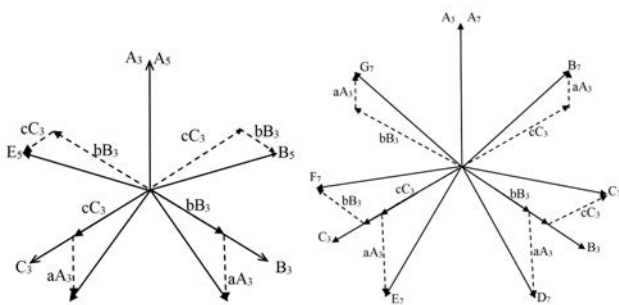


Рис. 2. П'яти- і семипроменеві зірки

Формуємо кожну з фаз п'ятифазної системи із частин векторів A_3, B_3, C_3 (система обмоток зигзаг у трифазному трансформаторі) як показано на рис. 2, тобто

$$\text{фаза } A_5 \quad A_5 = A_3 = 1, \\ \text{фаза } B_5 \quad B_5 = cC_3 + bB_3, \\ \text{Або}$$

$$0,309 - j0,951 = c(-0,5 + j0,866) + b(-0,5 - j0,866).$$

Розв'язуючи отримане рівняння відносно b і c , одержуємо:

$$b = 0,24, \quad c = -0,858.$$

Знак «-» вказує на те, що ця частина вектору C_5 береться зі зворотним вектору C_3 напрямком.

Значення b і c показують часткове значення векторів B_3 і C_3 при формуванні одиничного вектору B_5 .

Аналогічно розраховуються решта векторів п'ятифазної системи. Результати розрахунків зведено у табл. 1.

Таблиця 1

Вектори п'ятифазної системи

Вектор	A_5	B_5	C_5	D_5	E_5
a	1	0	-0,4695	-0,4695	0
b	0	0,24	0,679	0	-0,858
c	0	-0,858	0	0,679	0,24

У семифазній зірці (рис. 2) кут зсуву фаз

$$\frac{360}{7} = 51,43^\circ$$

нехай усі одержувані вектора також рівні 1, тобто $A_7 = B_7 = C_7 = D_7 = E_7 = F_7 = G_7 = 1$.

Тоді в комплексній формі запису

$$A_7 = 1, \quad B_7 = e^{-j51,43^\circ} = 0,624 - j0,782, \\ C_7 = e^{-j102,86^\circ} = -0,223 - j0,975, \\ D_7 = e^{-j154,29^\circ} = -0,901 - j0,434, \\ E_7 = e^{-j205,72^\circ} = -0,901 + j0,434, \\ F_7 = e^{-j257,15^\circ} = -0,273 + j0,962, \\ G_7 = e^{-j308,58^\circ} = 0,624 + j0,782.$$

Аналогічно формуємо кожну з фаз семифазної системи із частин векторів A_3, B_3, C_3 як показано на рис. 3, тобто

$$\text{фаза } A_7 \quad A_7 = A_3 = 1, \\ \text{фаза } B_7 \quad B_7 = cC_3 + aA_3, \\ \text{Звідки } a = 0,1725, \quad c = -0,903.$$

Результати розрахунків векторів семифазної системи зведено у табл. 2.

Таблиця 2

Вектори семифазної обмотки

Вектор	A_7	B_7	C_7	D_7	E_7	F_7	G_7
a	1	0,1725	0	-0,651	-0,651	0	0,1725
b	0	0	0,786	0,501	0	-0,565	-0,903
c	0	-0,903	-0,34	0	0,501	0,829	0

П'ятифазна обмотка виключає в кривій м.р.с. гармоніки, кратні 5, і в першу чергу, п'яту гармоніку, трифазна обмотка виключає гармоніки, кратні 3, і в першу чергу, третю гармоніку.

Семифазну обмотку з'єднуємо в правильний семикутник. У такому включенні семифазна обмотка виділяє сьому гармоніку й замикає її на себе. Для інших гармонік: першої (основної), третьої й п'ятої вона ніякого впливу не виявляє, оскільки сума векторів симетричних три- і п'ятифазних систем дорівнює 0.

Таким чином, семикутник не надає впливу на першу, третю й п'яту гармоніки, а тільки виділяє сьому. Оскільки семикутник замкнений коротко, усередині нього тече струм семиразової частоти. Але, якщо він тече усередині семикутника, сьома гармоніка буде виділятися усередині перетворювача у вигляді втрат і вона не буде міститися на виході перетворювача. Виходячи з викладеного, можна затверджувати, що пристрій нейтралізує третю, п'яту, сьому й кратні їм гармоніки. Найближчі, що залишилися, 11-а й 13-а гармоніки мають малі амплітуди й не надають істотного впливу на форму вихідної напруги.

Втрати у семифазній обмотці.

Втрати трифазної обмотці можна визначити звичайним способом.

У п'ятифазній – так само, як і в трифазній, але тільки врахувати, що кожна з обмоток фаз B_5, C_5, D_5, E_5 отримана за способом з'єднання обмоток у зигзаг та їх омичний опір являє собою суму складових кожної із зазначених фаз.

Для семифазної обмотки поступимо наступним чином.

Нехтуючи активним опором семифазної обмотки, визначимо струм у ній, враховуючи, що вона замкнена накоротко:

$$I_7 \approx \frac{U_7}{x_{k7}},$$

де U_7 – фазна напруга сьомої гармоніки, x_{k7} – індуктивний опір розсіювання фази семифазної обмотки.

Як відомо [5, с. 142], при розкладанні в ряд Фур'є періодичної функції прямокутного виду зі шпаруватістю 2 отримуємо:

$$f(\omega t) = \frac{4a_m}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right).$$

З наведеної формули випливає, що сьома гармоніка складає в пайовому відношенні $\frac{1}{7}$ від основної. Тоді $I_7 = \frac{U_1}{7x_{k7}}$, де U_1 – фазна напруга першої гармоніки. Але, оскільки частота сьомої гармоніки в 7 разів вище, ніж частота основної, її індуктивний опір також у 7 разів більше, ніж в основний, тобто

$$I_7 = \frac{U_1}{7 \cdot 7x_{k3}} \approx 0,02 I_{k33},$$

де $\frac{U_1}{x_{k3}} \approx I_{k33}$ – струм короткого замикання трифазної обмотки,

x_{k3} – індуктивний опір розсіювання фази трифазної обмотки.

При цьому активним опором цієї обмотки також нехтуємо.

Але струм короткого замикання трифазної обмотки пов'язаний із її номінальним струмом I_{k33} співвідношенням

$$I_{k33} = I_{k33} \frac{100}{u_{k3\%}},$$

де $u_{k3\%}$ – напруга короткого замикання у %.

Звідки слідує

$$I_7 = \frac{2}{u_{k3\%}} I_{k33}.$$

Якщо задатися умовою, що щільності струму в трифазній та семифазній обмотках рівні, то переріз семифазної обмотки має бути зменшеним у $\frac{2}{u_{k3\%}}$ разів. У цю ж кількість разів збільшиться її активний опір, тобто $r_7 = \frac{r_3}{2} u_{k3\%}$, де r_3 – активний опір трифазної обмотки.

Тоді омичні втрати в семифазній короткозамкненій обмотці дорівнюватимуть

$$P_{k37} = 7 \cdot I_7^2 \cdot r_7 = 7 \left(\frac{2}{u_{k3\%}} \right) \cdot I_{k33}^2 r_1 = \frac{14}{u_{k3\%}} P_{k31},$$

де $I_{k33}^2 r_3 = P_{k33}$ – омичні втрати у трифазній обмотці.

З виведеного співвідношення випливає, що при $u_{k3\%} = 10\%$ між трифазною та семифазною обмоткою втрати в короткозамкненій семифазній обмотці складуть 1,4 від втрат трифазної обмотки, при $u_{k3\%} = 14\%$ втрати в трифазній та семифазній обмотках будуть рівні.

Збільшення опору семифазної обмотки в $\frac{2}{u_{k3\%}}$ раз є наближенням, тому що не враховує того, що кожна з її фаз (крім фази А7) складається з двох напівобмоток трифазної системи, що належить різним фазам. Для уточнення цього параметра необхідно скласти по модулю всі складові обмоток зигзаг, а саме:

$$1 + 0,1725 + 0,903 + 0,786 + 0,34 + 0,501 + 0,651 + 0,501 + 0,651 + 0,829 + 0,565 + 0,903 + 0,1725 = 7,975.$$

Величина $\frac{7,925}{7} \approx 1,14$ визначає додаткове збільшення сумарного омичного опору семифазної обмотки з допомогою побудови її складових шляхом з'єднання обмоток зигзаг.

Аналогічно збільшення опору у п'ятифазній обмотці за рахунок її формування за типом зигзаг визначиться як

$$1 + 0,24 + 0,858 + 0,679 + 0,4695 + 0,679 + 0,4695 + 0,858 + 0,24 = 5,493$$

Коефіцієнт збільшення втрат для п'ятифазної обмотки визначиться як $\frac{5,493}{5} \approx 1,1$.

Уточнене значення втрат у семифазній обмотці визначиться як

$$P_{k7y} = 1,13 P_{k37} = \frac{16}{u_{k3\%}} P_{k33},$$

а з урахуванням відмінності діаметрів обмоток

$$P_{k7} = \frac{16}{u_{k3\%}} P_{k33} \frac{D_7}{D_3},$$

де D_3 та D_7 – діаметри трифазної та семифазної обмотки відповідно.

Висновки. Стаття розглядає інноваційні методи управління швидкістю обертання асинхронних двигунів, з особливим акцентом на зменшення комутаційних втрат та нейтралізацію гармонік. Пропонується новий підхід, використовуючи перетворювач для формування синусоїдальної напруги з прямокутної. Запропоновуваний перетворювач прямокутної напруги в синусоїдальну відрізняється підвищеною надійністю, простотою конструкції і обслуговування а також дозволяє відмовитись від рідинних систем охолодження ключів інвертора. Увага приділяється нейтралізації

третьої, п'ятої та сьомої гармонік за допомогою спеціально спроектованих обмоток. Аналіз втрат у семифазній обмотці відносно трифазної демонструє ефективність запропонованого методу. Цей

підхід може значно підвищити ефективність та знизити витрати на охолодження в асинхронних приводах, зокрема в морській індустрії та інших галузях промисловості.

Список літератури:

1. Белікова Л.Я., Шевченко В.П. Електричні машини: навч. посібник. Одеса, 2012. 480 с.
2. Трифазний мостовий автономний інвертор струму. Донецький національний технічний університет. URL: <https://studfile.net/preview/5685496/page:5/> (дата звернення 26.12.2023).
3. Сенько В.І., Трубіцин К.В., Чибеліс В.І. Інвертори і перетворювачі частоти. Київ, 2020. 300 с.
4. Спосіб одержання трифазної синусоїдальної напруги і пристрій для його здійснення: пат. 117170 Україна: МПК6, H02M 7/00, H02M 7/42, H02M 7/497. № a201610005; заявл. 30.09.2016; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12. 5 с.
5. Маляр В.С. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола: навч. посібник. Львів: Львівська політехніка, 2012. 312 с.

Gogloschapov S.S., Kolebanov O.K., Ivanov A.A. INNOVATIVE REGULATION METHOD SPEED QUALITY OF ASYNCHRONOUS MOTORS

Asynchronous machines are mainly used as motors. Due to the increased reliability and simplicity of the design, they are widely used in industry and on ships of the marine fleet, being the main consumers of electrical energy. Despite the mentioned advantages, they have a significant drawback – poor adjustment of the rotation speed. Of all the used methods of speed regulation: by changing the number of pole pairs, introducing resistance into the rotor circuit, changing the value of the supply voltage, changing the frequency of the power supply network, the frequency control method with intermediate conversion of the three-phase circuit voltage should be recognized as the most acceptable at present, thanks to the modern power electronic base into direct current and further formation of a given variable frequency voltage by the method of pulse width modulation (PWM). Although this method allows you to obtain a variable voltage of a given frequency with a sinusoidal shape of the curve, it has significant switching losses in the inverter keys, which leads to the need to use complex liquid cooling systems. These losses can be significantly reduced if the inverter keys generate a voltage of a given frequency of a rectangular shape, which is used to feed the engine through the proposed converter, in which the neutralization of higher harmonics is carried out by suppressing the third, fifth, seventh and multiples of harmonics. At the same time, the third harmonic is suppressed by a three-phase winding, which is the output of the device and connected in a three-beam star, the fifth by a five-phase winding fed from the inverter and connected in a five-beam star, the seventh by a seven-phase winding connected in a regular heptagon, closed briefly. The five-phase and seven-phase windings of the converter are formed from parts of three-phase windings by the zigzag connection type, the calculation of the components of five- and seven-phase windings from parts of three-phase is given. An analysis of the losses in the seven-phase winding relative to the main losses of the three-phase winding is also given.

Key words: phase, harmonics, winding, converter, losses, asynchronous motor.

ПРИЛАДИ

УДК 620.179.14

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/05>

Баженов В.Г.

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

Гльойнік К.А.

LUXOFT-UKRAINE, LLC

Лабунський П.І.

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

АВТОМАТИЧНА ВИХРОСТРУМОВА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ З ФІКСАЦІЄЮ КООРДИНАТ ДЕФЕКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОЇ МИШІ

Стаття присвячена розробці автоматичної вихрострумової системи з можливістю фіксації координати дефекту за допомогою комп'ютерної миші. Її використання дозволяє автоматизувати фіксацію координат дефектів і відповідно автоматизувати та значно зменшити час оформлення протоколів контролю. Корпус пропонується використати від комп'ютерної миші. Через це робиться акцент на мінімізації розмірів схеми. Що слугує оптимізації схеми дефектоскопа і вибору відповідних електронних компонентів. Також, при їх виборі, автори використовують передові мікросхеми та мікроконтролери, що сприяє малому енергоспоживанню та низькій ціні. Відомо, що процес оформлення протоколів контролю займає дуже багато часу. Авторами створена спеціальна програма з інтерфейсом, для вирішення цього завдання. Інтерфейс фіксації координат і параметрів дефектів виконаний на базі програмного пакета LabVIEW.

Аналізується запропонована авторами для створення такої системи оригінальна структура вихрострумового дефектоскопа, яка використовує високоточний ортогональний спосіб обробки сигналів. Вибір саме вихрострумового методу полягає в його великій чутливості до змін та великому спектрі застосування. Завдяки цьому можна знаходити дрібні зміни у структурі матеріалу або наявність дефектів. Він є потужним інструментом для пошуку дефектів, наприклад, мікротріщини, можливо виявити лише вихрострумовим методом. Його можна використовувати для контролю різних металів та композитів. У нього, відносно, висока швидкість контролю, що робить його ефективним для виробничих умов та контролю великих об'ємів матеріалів. Також його, відносно, легко автоматизувати, що сприяє підвищенню продуктивності та зменшенню людського впливу на процес. Принцип вихрострумової дефектоскопії полягає в розміщенні котушки на зразку для збудження магнітного поля, яке змінюється з часом, тим самим генеруючи вихрові струми в матеріалі. Внаслідок цього створюється вторинне магнітне поле, яке містить інформацію про дефекти в об'єкті контролю, яку ми отримуємо за допомогою вихрострумового перетворювача (ВСП).

Ключові слова: *неруйнівний контроль, вихрострум, дефектоскоп, автоматизація протоколу, координати дефекту, комп'ютерна миша в дефектоскопії, малий дефектоскоп.*

Постановка проблеми. Своєчасне виявлення дефектів у металевих деталях є актуальною задачею, оскільки допомагає забезпечити високу якість, безпеку та ефективність виробництва. Через неконтрольований розвиток дефектів, можуть відбутися руйнування деталей, що

призводить до аварій або навіть, фатальних наслідків.

Проблема полягає в пошуку та розробці технологічного рішення, яке зменшить час проведення контролю в металевих деталях. При цьому час оформлення протоколів контролю, який визна-

чається в основному часом фіксації координат дефекту, є значною складовою сумарного часу контролю, тому дуже важливо автоматизувати цей процес. Таким чином актуально створити систему з автоматичною фіксацією координат дефектів, що значно прискорить оформлення протоколів контролю. Також, через великі габарити обмежується мобільність оператора, що призводить до втрати часу. Тому важливо мати для таких випадків дефектоскопи з малими габаритами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження та публікації в області використання вихрострумowego методу для виявлення дефектів в матеріалах вказують на поступовий розвиток цієї галузі. Аналізуючи наявні вихрострумові сучасні дефектоскопи, такі як EddyMax 4U, Phasec 2000, MIZ-27, ELOTEST B300, ELOTEST PL.E, та інші [1]. Зроблені висновки, що попри свою технічну потужність, ці дефектоскопи вражають своєю функціональністю, але через складність схеми такі дефектоскопи мають вагу від 3 до 14 кг, а розміри варіюються від 210 мм до 450 мм, це може викликати труднощі при транспортуванні та зберіганні. Важкість та розміри можуть обмежувати мобільність оператора. Також у цих дефектоскопів зазвичай відсутня можливість автоматичної реєстрації координат положення дефектів, на що витрачається дуже багато часу. Тому автоматизація цього процесу є дуже актуальна. За останніми дослідженнями, більшість систем фокусується на традиційних інтерфейсах та методах аналізу параметрів дефектів, залишаючи поза увагою інтеграцію з засобами автоматичної реєстрації їх координат знаходження.

Відомі роботи, в яких для визначення координат використовуються звичайні системи глобального позиціонування (GPS), наприклад системи контролю залізничних рейок, які мають велику протяжність, але і там вони можуть бути не основними внаслідок великих помилок [2]. Ці помилки, як відомо, можуть досягати від 5–10 м іноді і більше, тому використання таких методів поки що дуже обмежено. Відомі системи визначення координат при контролі дефектів, які також використовують методи триангуляції, але вони потребують додаткового обладнання, доволі громіздкого і складного для постановки джерел випромінювання або приймання відповідних типів сигналів від акустичних до електромагнітних, як навкруги

об'єкта, який контролюється так і на самому сенсори контролю. При контролі в випадках лінійного переміщення сенсора контролю дуже часто використовують звичайні механічні датчики переміщень, наприклад у вигляді енкодерів. Малі розміри миші, яка фактично реєструє на моніторі ПК її 2D положення на столі наводить на ідею її використання для реєстрації положення вихрострумowego сенсора. Такий підхід відомий, але йому не приділялось достатньо уваги [3].

Таким чином, необхідно подальше дослідження в напрямку інноваційних інтерфейсів, таких як використання комп'ютерної миші, для оптимізації взаємодії з дефектоскопією.

Постановка завдання. Дослідити можливість створення автоматичної вихрострумовой системи контролю дефектів з автоматичною фіксацією координат і параметрів дефектів безпосередньо під час контролю, на базі комп'ютерної миші. Головна ідея, це об'єднання схеми комп'ютерної миші з дефектоскопом, для знаходження координат і параметрів дефекту. Оскільки для корпусу системи, ми будемо використовувати корпус миші то приділяється велика увага вибору схеми дефектоскопа і вибору його компонентів для її реалізації. Даний дефектоскоп, має будуватись на найсучасніших електронних компонентах. Це дасть можливість його гнучкого налаштування та реалізувати схему в мінімальних габаритах, що в нашому випадку є основною задачею. Також, він має використовувати метод що вимірює фазу та амплітуду. Саме за цими параметрами ми будемо визначати наявність дефекту. Автоматизацію оформлення протоколів потрібно реалізувати програмно, це є актуальною задачею і сильно прискорить загальний час контролю деталі. Для фіксації координат і параметрів дефектів пропонується розробити програму в програмному пакеті LabVIEW.

Виклад основного матеріалу. Обґрунтування вибору схеми дефектоскопа. Головною задачею при розробці даної системи є вибір функціональної схеми дефектоскопа. Основною вимогою при реалізації схеми дефектоскопа це є мінімальні габарити й мінімальне споживання енергії, тому для виконання цієї вимоги авторами була запропонована схема цифрового багатофункціонального вихрострумowego дефектоскопа (ВД) [4], схему якого наведено на рис. 1.

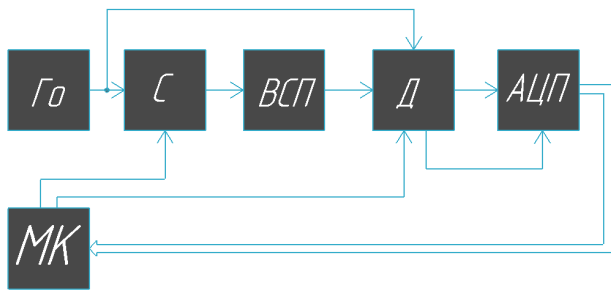


Рис. 1. Функціональна схема цифрового багатфункціонального вихрострумowego дефектоскопа

Де G_0 – послідовно з’єднані генератори опорних імпульсів; C – синтезатор з програмою зміни частоти та фази; BSP – вихрострумний перетворювач (ВСП); D – програмно синхронний демодулятор; ADC – аналого-цифровий перетворювач (АЦП); MC – мікроконтролер (МК).

Головна перевага цієї схеми в тому, що вона реалізує ортогональний спосіб обробки даних в цифровому вигляді, що значно спростить обробку даних без використання складних процесорів цифрової обробки сигналів.

Запропонована схема працює наступним чином: Сигнал с генератора синхронної частоти G_0 подається на вхід синтезатора частоти C , значення вихідної частоти та початкової фази якого визначається кодом з мікроконтролера MC . Вихідний сигнал синтезатора підсилюється і потрапляє на вихрострумний перетворювач BSP . Амплітуда і фаза на виході BSP буде залежати від об’єкта контролю та наявності в ньому дефектів. Отримавши певні зміни вимірювального сигналу з виходу BSP вимірювальний сигнал буде потрапляти на інформаційний вхід спеціального синхронного амплітудного детектора D , на другий опорний вхід цього детектора буде потрапляти опорний синхросигнал с генератора G_0 зі значно вищою, але кратною частотою, яка за допомогою програми MC формує за рахунок децимального фільтра (LPF) (керованого високою частотою) із вхідного інформаційного сигналу відфільтрований високостабільний у вигляді послідовності 8-мі (або 4-х) рівновіддалених в часі сходинок (формуючих сигнал).

Вхідний інформаційний сигнал можна в спрощеному вигляді записати так:

$$a_1(t) = A_1 \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

де A_1 – амплітуда вимірювального сигналу; ω – циклічна частота; φ – початкова фаза вхідного сигналу, який потім перемножується в схемі (ADA2200) з опорним сигналом, сформованим

з сигналу генератора G_0 , який також в спрощеному вигляді можна представити так:

$$b_1(t) = B_1 \cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

де B_1 – амплітуда опорного сигналу.

В результаті цього перемноження будемо мати постійну синусну складову в вигляді:

$$a_s(t) = \frac{1}{2} k A_1 B_1 \sin(\varphi) \quad (3)$$

де k – коефіцієнт перетворення перемножувача.

І також синусну складову зі змінною подвійною частотою:

$$a_{s1}(t) = \frac{1}{2} k A_1 B_1 \sin(2\omega t + \varphi) \quad (4)$$

Яка відфільтровується в схемі (ADA2200) за допомогою вбудованого в нею відповідного фільтра.

По команді MC фази опорного сигналу можна змінити на 90° в схемі (ADA2200) що, як відомо, замість опорного косинусоїдального сигналу отримаємо опорний синусоїдальний сигнал який в спрощеному вигляді можна представити так:

$$b_{1s}(t) = B_1 \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (5)$$

А після перемноження відповідно отримати косинусну постійну складову:

$$a_c(t) = \frac{1}{2} k A_1 B_1 \cos(\varphi) \quad (6)$$

Цифрові коди з АЦП, вхід якого підключений до виходу синхронного амплітудного детектора D потрапляють на MC де вже значення амплітуди та фази будуть визначатися за наступними формулами:

$$A = \sqrt{a_s^2 + a_c^2} \quad (7)$$

$$\varphi = \arctg \frac{a_s}{a_c} \quad (8)$$

Але відповідно в цифровому вигляді.

Таким чином реалізується ортогональний високоточний, завадостійкий метод визначення як амплітуди, так і фази вимірювального сигналу. Слід пам’ятати, що рішення про присутність дефекту приймається при визначенні різниці результатів вимірювань як амплітуд та фаз в сусідніх точках, причому очевидно, що в цифровому вигляді це реалізується дуже просто.

Також, слід підкреслити що використання синтезаторів частоти, в яких, як відомо, фаза та амплітуда вихідних сигналів може змінюватися по командах MC з дуже малим кроком, дозволяє в запропонованій структурі дефектоскопа реалізувати другий значно більш точний алгоритм вимірювання амплітуди та фази сигналів який не потребує зміни фази сигналу на 90° . Який складається із наступного: З початком контролю по командах мікроконтролера MC здійснюється зміна початкової фази сигналу синтезатора

частоти шляхом введення коду, у відповідний регістр цього синтезатора до того часу, поки значення амплітуди (значення коду) на виході АЦП не буде максимальною. Максимальне значення амплітуди на виході АЦП, яке аналізується мікроконтролером і буде свідчити про повну компенсацію зсуву фаз сигналу на виході вихрострумowego перетворювача ВСП. Таким чином, за значенням максимальної амплітуди a_c на виході АЦП буде визначатись амплітуда A_1 інформаційного сигналу згідно з простого виразу:

$$a_c(t) = \frac{1}{2} k A_1 B_1 \quad (9)$$

А значення коду компенсації фази, що подався на синтезатор частоти С, з мікроконтролера МК (при якому значення амплітуди досягло максимуму), буде визначати значення зсуву фаз інформаційного сигналу на виході вихрострумowego перетворювача ВСП при знаходженні дефекту. Як впливає з вищезазначеного, фактично, при вимірюванні зсуву фаз в такому випадку реалізується компенсаційний метод виміру, який являється найбільш точним. Причому АЦП використовується при вимірюванні максимальних значень амплітуди, тому такі вимірювання амплітуд, як відомо, вони найбільш точні. Але при визначенні фази методом компенсації найбільш точні вимірювання коли фаза дорівнює «0», бо, як відомо, швидкість зміни фази найбільша поблизу нульових її значень тому в цьому випадку також може бути іноді доцільно після вимірювання амплітуди змінити фазу на 90° в синхронному детекторі і додатково підлаштувати зміну фаз в синтезаторі частоти на мінімальне значення амплітуди.

Даний дефектоскоп будується на базі найсучасніших електронних компонентах, таких як мікроконтролери та мікросхеми, що дає змогу гнучко її налаштувати за допомогою перепрограмування мікроконтролера. Можна легко змінювати частоту, амплітуду, фазу і параметри налаштування фільтра синхронного детектора Д. Цей підхід дозволяє максимально зменшити розміри схеми та реалізувати її в мінімальних габаритах, використовуючи при цьому ортогональний метод обробки даних тобто при одночасній високій точності вимірювання як амплітуд, так і фаз інформаційних сигналів (отже аналіз дефектів буде проводитися за двома параметрами амплітудою та фазою і відповідно високій достовірності визначення параметрів дефектів, що для нас є головним у виборі дефектоскопа.

Конструкція мишки. Вибір мишки є довільним, головною задачею є наявність оптичного

датчика. Авторами обрали “NetScroll 110” фірми Genius [5], зовнішній вигляд наведено на рис. 2.1 та плату мишки на рис. 2.2.

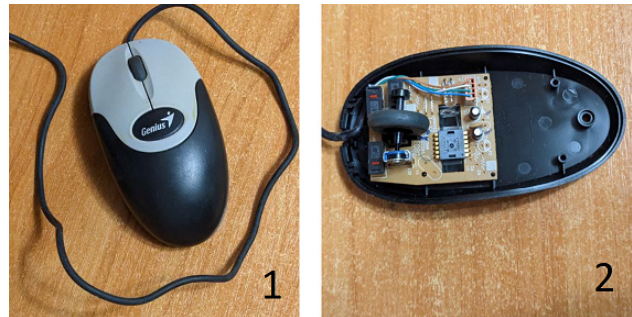


Рис. 2. Зовнішній вигляд мишки NetScroll 110

Використання комп’ютерної мишки дозволяє спростити фіксування координати дефектів. Як видно з рис. 2.2 половину корпусу мишки вільно, отже вирішено зайняти цю частину дефектоскопом. Але сам ВСП потрібно поставити максимально близько до сенсора мишки, це програмно коригується. Розміщення ВСП в корпусі мишки видно на рис. 3.

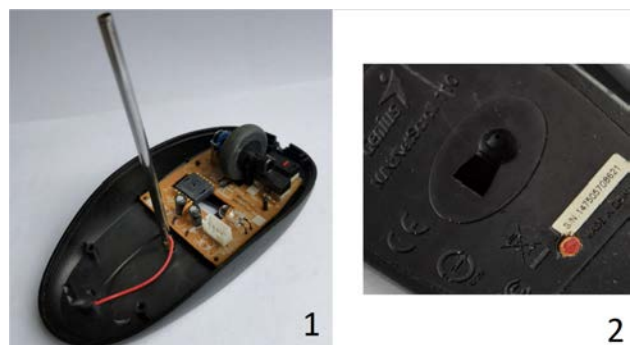


Рис. 3. Розміщення сенсора мишки і ВСП

Експериментальна схема. Було створено експериментальну схему системи для її моделювання рис. 4. Для цієї системи потрібен один чіп мікроконтролера, синтезатор, генератор, підсилювач, демодулятор, АЦП, ВСП та плата мишки.

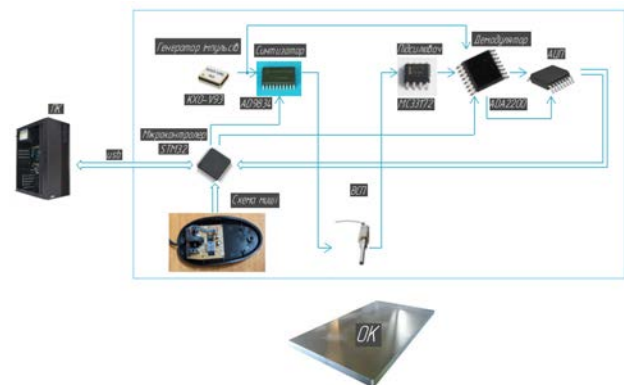


Рис. 4. Блок-схема системи

При виборі всіх компонентів, головним завданням була мінімізація розмірів. Також, важливим параметром є його функціональні можливості, мала енергозатратність та вартість. Загалом автори пропонують використовувати для даної системи такі електронні компоненти: генератор прямокутних імпульсів КХО-V93 [6], мікросхема синтезатора частоти AD9834 [7], мікросхема демодулятора ADA2200 [8], чіп мікроконтролер STM32F103C8T6 [9].

Генератора імпульсів призначений для синхронізації роботи всіх блоків дефектоскопа, що фактично дозволяє крім вимірювань амплітуди сигналів вимірювати і їх фазу. Вибір припав на SMD КХО-V93, розміри якого складають 1.6x1.25x0.8 мм.

Синтезатор частоти зазвичай використовується для створення стабільних і точних (з мінімальним коефіцієнтом гармонік) сигналів зазначених частот. Вибір припав на мікросхему синтезатора частоти AD9834, в якій реалізується метод прямого цифрового синтезу (DDS), розміри якої складають 6.6x6.5x1.1 мм. Це малопотужна мікросхема її споживання енергії менше ніж 20 мВт. Працює в широкому діапазоні частот, висока стабільність і має апаратне керування фазою. Вона здатна генерувати стабільний синусоїдальні сигнали. Також, дозволяє програмно налаштувати вихідну частоту і фазу сигналу з дуже малим кроком, що робить її гнучкою для різноманітних застосувань.

Особливої уваги заслуговує мікросхема синхронного програмованого демодулятора ADA2200, яка внаслідок унікальної будови, сильно спрощує схему дефектоскопа. Оскільки ця схема дозволяє перемножувати два сигнали в широкому діапазоні зміни амплітуди вхідного сигналу, причому частота опорного сигналу кратна вихідній частоті синтезатора (збудження ВСП), але значно вище її. Цей опорний сигнал, який подається на опорний вхід «clkIn» виконує децимацію інформаційного вхідного сигналу завдяки програмному фільтру LPF (який керується командами МК). Відбувається децимація вхідного сигналу й утворюється перетворений сигнал у вигляді послідовності 8-мі (або 4-х в залежності від команд МК) рівновіддалених в часі сходинок (формуючих сигнал), фаза якого буде вже зв'язана однозначно з фазою генератора синхронних сигналів T_0 і відповідно з фазою сигналу з виходу ВСП, який ми повинні контролювати. Також демодулятор ADA2200, може модулювати опорний сигнал на 90 градусів, що дає нам можливість реалізувати ортогональний метод обробки інформаційного

сигналу. Також дуже важливо і те що ця мікросхема виконує відповідну фільтрацію після перемноження сигналів і в структуру мікросхеми вбудований драйвер з диференціальними виходами для безпосереднього підключення АЦП і, крім того, ця схема формує сигнали запуску АЦП «RCLK». І все це розміщується в одному корпусі розміром 5.1x6.4x1.2 мм.

Для керування системою та обробки головної інформації запропоновано використовувати мікроконтролер STM32F103C8T6 LQFP48, розміри якої складають 9.15x9.15x1.6 мм. Він має ряд функціональних переваг, серед яких слід виділити розширені можливості в розрахунку тригонометричних функцій. В даній системі можна обійтись без зовнішнього багаторозрядного АЦП і замінити його внутрішнім АЦП мікроконтролера, який може запуститись зовні. В даному випадку можна скористатися і 16 розрядними сігма дельта АЦП, які значно підвищують чутливість розробляємої системи по визначенню параметрів дефектів. Даний підхід спростить схему та сприяє зменшенню розмірів дефектоскопа.

З вищевказаного можна стверджувати, що використання найсучаснішої багатофункціональної елементної бази дозволяє значно зменшити габарити, та споживання енергії з одночасним підвищенням достовірності вихрострумовевого контролю запропонованої структури дефектоскопа

Інтерфейс програми. В даній системі використовується дві програми, перша для налаштування мікропроцесора, друга для графічного інтерфейсу. Налаштування мікропроцесора відбувається в програмі STM32Cube IDE, за допомогою спеціальна написаного коду.

Інтерфейсна частина виконується за допомогою спеціально створеної для цього програми в LabVIEW [10].

В даній програмі, можна співвіднести положення курсора на екрані з реальним положенням миші в просторі, в реальному часі, для цього передбачено спеціальне числове поле з положенням X та Y, та графічне відображення, для простоти використання. Також є можливість запису і візуалізації координат дефектів, які ми знаходимо в ході аналізу об'єкта контролю. В програмі передбачено числовий показ еталонних значень амплітуди та фази, поточного значення частоти, координати миші, зміни амплітуди та фази та табличне відображення номера зразка і дефектів, які ми знаходимо з усіма необхідними параметрами. Загальний вигляд інтерфейсу програми видно на рис. 5.

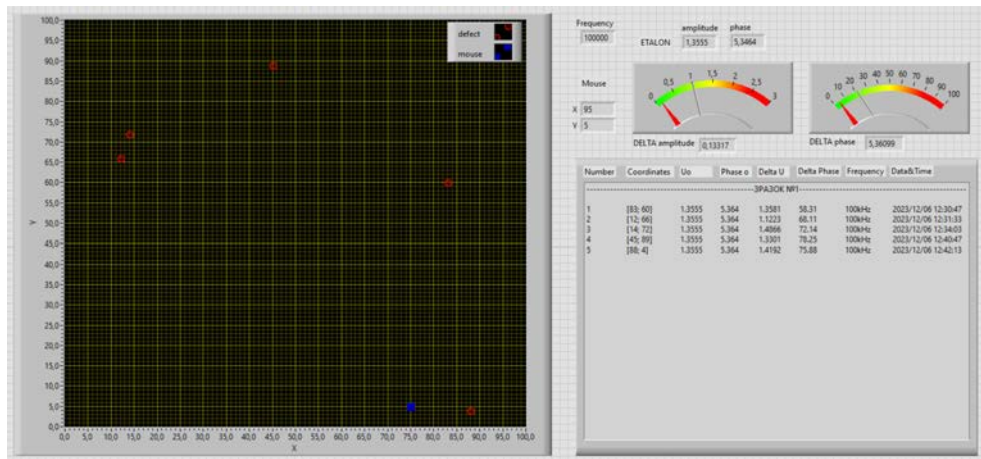


Рис. 5. Загальний вигляд інтерфейсу програми

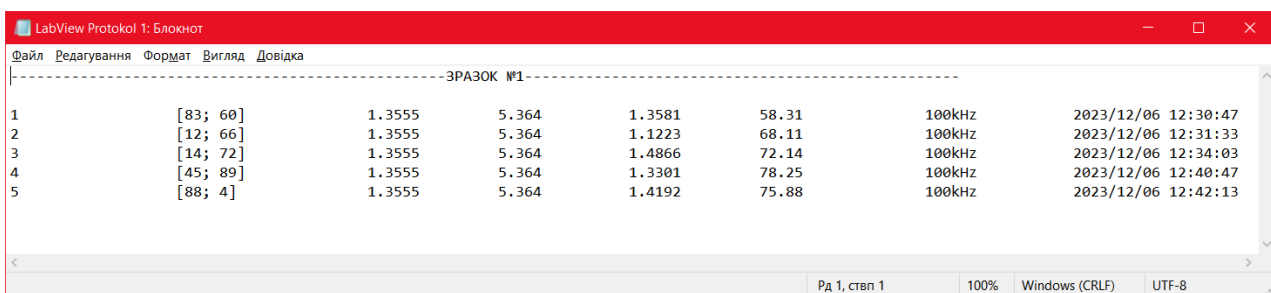


Рис. 6. Збережений протокол

Керування системою.

Керування включає:

- Ліва кнопка миші для фіксації дефектів;
- Права для фіксації еталону амплітуди та фази;
- Прокрутка коліщатка миші дозволяє змінювати частоту опорного сигналу;
- Натискання на коліщатко миші, зберігає всі дані в текстовий файл та скидає всі візуальні дані;

Алгоритм знаходження дефектів. Для початку слід визначити параметри ОК, потім відповідно обирається значення частоти, її вибирають в залежності від матеріалу об'єкта контролю або бажаної глибини контролю дефектів. Її можна змінювати прокручуючи коліщатко миші. Для правильної роботи програми, потрібно взяти дефектоскоп, прикласти його до об'єкта контролю і натиснути праву кнопку миші, щоб зберегти поточне значення амплітуди та фази. Після чого слід водити по об'єкту контролю, поточні координати видно у графічному вікні (квадратик) або цифри в відповідному числовому вікні. Дивлячись, чи не змінюється значення “DELTA amplitude” і “DELTA phase” Причому рухи мають бути плавними, оскільки різкі рухи призводять до втрати інформації. Якщо значення змін виходить за критичне, значить в цій ділянці є зміни в об'єкті контролю,

тобто дефект. Для фіксації дефекту слід натиснути ліву кнопку миші, після чого вона добавиться на графічне вікно, і в таблицю (протокол), де червоні (круглі) мітки на екрані будуть візуалізувати місце знаходження дефектів, якщо потім треба визначити параметри дефекту після проведення контролю, то треба підвести курсор миші до цієї мітки і натиснути відповідну кнопку миші і в цьому місці ми отримаємо всі значення параметрів. Після проходження всієї поверхні, і знаходження всіх дефектів, слід натиснути коліщатко миші, для збереження всіх даних і очищення всіх даних в графічному вікні. Також буде збережений файл куди будуть записані всі необхідні значення знайдених дефектів, а саме: номер, координату, еталону амплітуди і фази, дельта амплітуди та фази, частоту при якій вимірювався даний дефект, дата і точний час рис. 6.

Висновки. Для розв'язання поставленої задачі, а саме автоматизації оформлення протоколу контролю виробів вихрострумовим методом, було запропоновано використати комп'ютерну мишу для фіксації координат і параметрів дефекту з вбудованим ВСП. Складене відповідне ПО в програмному середовищі «LabVIEW», яке демонструє ці можливості в наведених рисунках. Це стало можливим завдяки використанню розробленої

авторами цифрової структури ВД на базі ортогонального методу, орієнтованого на найсучаснішу елементну базу електронних компонентів, (яка була наведена та обґрунтована вище), що дозволило виконати обробку (інформаційного) сигналу відгуку в цифровому вигляді з достатньо високою точністю без використання потужних ДСП і одночасно значно зменшити розміри й енергоспоживання ВД. Вищезазначене дозволило вбудувати електричну схему ВД разом з ВСП в корпус комп'ютерної миші з можливістю підключення до ПК або планшета створити автоматизовану вихроструміву систему контролю відповідних об'єктів. Використання цифрової обробки сигналів дозволить також автоматизувати початкові налаштування ВД.

Дана система має кілька напрямків для продовження. По-перше, в даному корпусі та з використанням звичайного сенсору миші, контроль не плоских деталей, неможливий. Якщо замінити

мишку на так звані 3D-миші або трекболи, то буде можливість контролю складних поверхонь.

Сучасний стан електроніки дозволяє реалізувати дефектоскоп дуже малих розмірів, фактично можна реалізувати дефектоскоп у вигляді авторучки з вмонтованим сенсором, і підключатися за допомогою USB шнура до комп'ютера. Це дасть можливість значно підвищити мобільність дефектоскопії та контролювати деталі складної форми, також він буде ефективним в умовах обмеженого доступу або труднодоступних місцях, завдяки компактним розмірам та гнучкості в експлуатації, що робить його більш практичним та мобільним. По-друге, у надалі можна використовувати бездротові системи передачі такі як Bluetooth, LoRa та інші. Це дасть можливість вільно переміщатися під час вимірювань без обмежень, пов'язаних із кабелями. малі габарити системи дозволять надалі повністю роботизувати процес контролю, якщо цю систему вмонтувати в руку робота.

Список літератури:

1. Учанін В. М. накладні вихрострумові перетворювачі подвійного диференціювання : навч. посіб. Львів: СПОЛОМ, 2013 р.
2. Серий К. М. Автоматична координатна реєстрація результатів контролю дефектоскопами : Дисертація. Київ: КПІ. ім. Ігоря Сікорського, 2010 р. 129 с.
3. Artur Lopes Ribeiro, F. Corrêa Alegria, Octavian Postolache, Helena Geirinhas Ramos, M. Simões, J. Pimentel, P. Maurício, J. Calvário, A. Carvalho T. 1 DEEC / USING A MOUSE POINTER AS A POSITIONING DEVICE IN EDDY CURRENT TESTING / IMEKO / URL: <https://www.imeko.org/index.php/proceedings/2580-using-a-mouse-pointer-as-a-positioning-device-in-eddy-current-testing/> / 07.11.2009p./ 4 с.
4. Патент України на винахід №117877 від 10.10.2018 МПК G01N27/61 (2006.01), G01N27/90 (2006.01) Цифровий багатофункціональний вихрострумівий дефектоскоп/ Баженов В.Г., Глойник К.А. Бюл.№19/2018 від 10.10.2018 номер заявки 2017 01266 від 13.02.2017 р.
5. Datasheet NetScroll 110 Stylish optical mouse / Manualslib / URL: <https://www.manualslib.com/manual/348980/Genius-Netscroll-110x.html> / 1 с.
6. Datasheet Clock Oscillator SMD-version KXO-V93T / GEYER Electronic / URL: <https://www.geyer-electronic.de/wp-content/uploads/2022/11/KXO-V93T.pdf> / 01.07.2022p / 1 с.
7. Datasheet Analog Devices AD9834 / Alldatasheet / URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/48601/AD/AD9834.html> / 20 с.
8. Datasheet Analog Devices AD2200 / Alldatasheet / URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/903020/AD/ADA2200.html> / 25 с.
9. Datasheet NXP Semiconductors LQFP48 / Alldatasheet / URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/513976/NXP/LQFP48.html> / 74с.
10. LabVIEW, "National Instruments," [Online]. URL: <http://www.ni.com/labview/pt/>.

Bazhenov V.G., Gloinik K.A., Labunskiy P.I. AUTOMATIC EDDY CURRENT INSPECTION SYSTEM WITH FIXING THE COORDINATES OF DEFECTS USING A COMPUTER MOUSE

The article is devoted to the development of an automatic eddy current system with the ability to fix the coordinate of a defect using a computer mouse. Its use makes it possible to automate the fixation of the defect coordinate and, accordingly, to automate and significantly reduce the time of drawing up inspection reports. The case is proposed to be used from a computer mouse. Because of this, the emphasis is on minimizing the size of the circuit. This serves to optimize the flaw detector circuit and select the appropriate electronic components. Also, when choosing them, the authors use advanced chips and microcontrollers, which contributes to low power consumption and low price. It is known that the process of drawing up control protocols takes a lot of time. The authors have created a special program with an interface to solve

this problem. The interface for fixing the coordinates and parameters of defects is based on the LabVIEW software package.

We analyze the original structure of an eddy current flaw detector proposed by the authors to create such a system, which uses a highly accurate orthogonal signal processing method. The choice of the eddy current method is based on its high sensitivity to changes and a wide range of applications. It allows detecting small changes in the material structure or the presence of defects. It is a powerful tool for finding defects, such as microcracks, that can only be detected by the eddy current method. It can be used to inspect various metals and composites. It has a relatively high inspection speed, which makes it effective for production environments and the inspection of large volumes of materials. It is also relatively easy to automate, which helps to increase productivity and reduce human intervention in the process. The principle of eddy current flaw detection is to place a coil on the sample to excite a magnetic field that changes over time, thereby generating eddy currents in the material. As a result, a secondary magnetic field is created that contains information about defects in the object under inspection, which we obtain using an eddy current transducer (ECT).

Key words: *Nondestructive testing, eddy current, flaw detector, protocol automation, defect coordinates, computer mouse in flaw detection, small flaw detector.*

ЕНЕРГЕТИКА

УДК 620.9:697.32

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/06>

Боженко М.Ф.

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

Камишний Б.М.

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

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ДИМОВИХ ГАЗІВ КОТЕЛЕНЬ

Стаття присвячена розробці енергозберігаючих заходів в котельнях систем централізованого та помірно-централізованого теплопостачання, а саме – утилізації теплоти димових газів водогрійних та парових котлів при спалюванні в них природного газу. Теплоутилізаційні установки поверхневого або контактного типів можуть експлуатуватися в «сухому» або «мокрому» режимах. В першому з них від димових газів відводиться тільки «явний» потік теплоти, їх охолодження відбувається при постійному вологовмісті до температури, яка приблизно на 5 °С більша за температуру точки роси. При «мокрому» режимі відбувається глибоке охолодження димових газів до температур, які нижчі за температуру точки роси, при цьому від них відводяться потоки «явної» та «прихованої» теплоти. Підвищити ефективність утилізаторів при глибокому охолодженні димових газів можливо також і при зволоженні дуттьового повітря. Потоки відведеної в теплоутилізаторах теплоти можна корисно використовувати для нагрівання води власних потреб котелень (сирої або хімічно підготовленої), гарячого водопостачання споживачів, зворотної води теплових мереж тощо. Аналіз дослідження порівняльної ефективності поверхневих та контактних утилізаторів, виконаних в КПІ ім. Ігоря Сікорського показав, що з економічної точки зору за мінімальною величиною зведених витрат найефективнішими є утилізатори-калорифери. В роботі виконане узагальнення попередніх досліджень енергетичної ефективності поверхневих калориферів, які встановлені за водогрійними котлами при їх роботі в «сухому» і «мокрому» режимах, у тому числі і зі зволоженням дуттьового повітря. В результаті числових розрахунків отримані узагальнені залежності коефіцієнта байпасування та питомої кількості відведеної теплоти від температур димових газів на виході та температур і вологовмістів на вході. Розрахунки виконані для трьох режимів роботи утилізаторів: «сухого», при глибокому охолодженні димових газів, при глибокому охолодженні димових газів зі зволоженням дуттьового повітря. Отримані залежності можуть бути використані в режимі реального часу для визначення можливої максимальної кількості відведеної теплоти, або для регулювання теплопродуктивності утилізаторів у залежності від необхідного потоку теплоти для нагрівання води зовнішніх споживачів.

Ключові слова: котел, димові гази, температура, утилізатор, кількість теплоти, коефіцієнт байпасування, вода, енергетична ефективність.

Постановка проблеми. Відомо, що одним з джерел теплопостачання в децентралізованих, помірно-централізованих та централізованих системах теплопостачання можуть бути котельні з водогрійними та паровими котлами. В роботі [1] зазначено, що в Україні експлуатуються близько 45 тис. котлів потужністю 0,1–30 МВт з техніко-економічними та екологічними показниками, що не відповідають сучасному європейському рівню, причому більшість

з цих котлів відпрацювала свій заводський ресурс. Автори роботи пропонують провести модернізацію існуючих котлів шляхом заміни поверхонь нагріву конвективних шахт без збільшення їх габаритних розмірів та наводять приклади такої модернізації для деяких конструкцій.

Також дієвим способом підвищення ефективності котлів і котелень в цілому є зменшення температури відхідних димових газів шляхом

встановлення за ними утилізаторів теплоти при роботі на природному газі, що дозволить збільшити ККД, а також корисно використати утилізовану теплоту для нагрівання води різного призначення.

Утилізатори теплоти можуть бути поверхневими та контактними і експлуатуватися в так званому «сухому» або «мокрому» режимах. В першому з них від димових газів відводиться тільки «явний» потік теплоти, а в другому – окрім «явного», ще й «прихований».

В роботі [2] з посиланнями на відповідні літературні джерела описані типи поверхневих та контактних теплоутилізаторів, які використовуються для нагрівання води власних потреб котельень та інших можливих споживачів. Калорифери типу КсК зі спіральним оребренням розглядалися як поверхневі утилізатори, а серед контактних виділені конструкції контактних теплоутилізаторів з активною насадкою (КТАНів-утилізаторів та КТАНів-повітрянагрівачів) розробки Латдіпропрома та екологічно чистої теплоутилізаційної установки (ЕКТ) розробки Інституту енергозбереження НАН України.

Також конструкції зазначених вище і інших теплоутилізаційних установок, схемні рішення стосовно їх розташування в газовому та водяному трактах котельень, методики розрахунків та вибору викладені в роботах Аронова І.З., Семенюка Л.Г., Фіалко Н.М., і інших авторів.

Серед сучасних підходів до глибокої утилізації теплоти димових газів можна виділити роботи [3–5], де запропоновані комплексні теплоутилізаційні установки з підігріванням та зволоженням дуттьового повітря і нагрівання води різних потреб (зворотньої з теплових мереж, хімічно очищеної, технологічних споживачів, гарячого водопостачання).

При глибокому охолодженні димових газів важливим фактором експлуатації теплоутилізаційних установок є виключення конденсації водяних парів в газовому тракті і димовій трубі, тобто потрібно забезпечити температуру димових газів в цих елементах не менше за 60°C. Уникнути конденсації утворенню можна наступними способами [6]:

- підігріванням охолоджених димових газів у поверхневому теплообміннику, нагрівальним теплоносієм в якому може бути гаряча вода після водогрійних котлів (для водогрійних котельень), або гарячі димові гази, що відібрані перед економайзером парового котла (для котельень з паровими котлами);

- підмішуванням до відхідних газів повітря, нагрітого в повітрянагрівачі котельні (для котельень з паровими котлами);

- байпасуванням частини димових газів поза теплоутилізаторами (для котельень всіх типів).

В роботі [7] наведені результати дослідження тепловологісних режимів експлуатації залізобетонних, цегляних та металевих димових труб комунальних котельень при застосуванні сучасних теплоутилізаційних технологій з тепловими методами захисту газовідхідних трактів. Автори обґрунтували використання для запобігання конденсації утворення в димових трубах різного типу таких методів як байпасування частини димових газів повз утилізатор, підсушування цих газів у газопідігрівачах і зовнішня теплоізоляція труб.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Найпоширенішими теплоутилізаційними установками, які доведені до промислового виробництва, а також практичного використання в котельнях та на ТЕЦ, є поверхневі утилізатори-калорифери, КТАНи, ЕКТ. Дослідження порівняльної ефективності поверхневих калориферів та КТАНів для утилізації теплоти димових газів пароводогрійних котельень показало, що з економічної точки зору за мінімальною величиною зведених витрат найефективнішими є поверхневі утилізатори-калорифери [8]. В роботі [9] виконані порівняльні розрахунки енергетичної і екологічної ефективності теплоутилізаційних установок з КТАНом-утилізатором – КТАНом-повітрянагрівачем, з ЕКТ, з поверхневими утилізаторами-калориферами, при глибокому охолодженні димових газів і зволоженні дуттьового повітря. Розрахунки виконані для теплоутилізаційних установок, встановлених в опалювальній водогрійній котельні за водогрійним котлом КВ-ГМ-10. Було показано, що теплоутилізаційна установка з поверхневими калориферами характеризується найвищими показниками енергетичної і екологічної ефективності.

В роботах [10–12] наведені результати розрахункових досліджень енергетичної і екологічної ефективності використання поверхневих калориферів для утилізації теплоти димових газів водогрійних котельень. Дослідження проводилися при роботі калориферів в «сухому» і «мокрому» режимах, у тому числі і при нагріванні та зволоженні дуттьового повітря. У всіх розрахункових схемах для запобігання конденсації водяних парів в газовому тракті і в димовій трубі обрано метод байпасування частини димових газів в обхід калориферів, оскільки він потребує мінімальних капіталовкладень порівняно з іншими наведеними в роботах [6, 7]. В результаті числових розрахунків були отримані окремі залежності коефіцієнта байпасування (для «мокрого» режиму) і питомих

потоків або кількості відведеної теплоти від температури охолоджених димових газів для різних температур димових газів на вході в калорифери в інтервалі 140–190°C. Слід також зазначити, що можливі потоки відведеної від димових газів теплоти та необхідні для нагрівання води різного призначення, а також її вхідних і вихідних температур, не завжди співпадають.

Метою статті є отримання узагальнених залежностей коефіцієнта байпасування та питомої кількості відведеної від димових газів теплоти у залежності від температури охолоджених димових газів та їх температури на вході в калорифери. Отримані залежності можуть бути використані в режимі реального часу для визначення можливої максимальної кількості відведеної теплоти, або для регулювання теплопродуктивності утилізаторів у залежності від необхідного потоку теплоти для нагрівання води зовнішніх споживачів.

Виклад основного матеріалу. Питому кількість відведеної від димових газів теплоти в утилізаторі при будь-якому режимі його роботи, кДж/кг с.г, можна визначити за відомим рівнянням теплового балансу

$$q_{\text{к.г}} = (1 - \theta_r)(h'_3 - h''_3), \quad (1)$$

де θ_r – коефіцієнт байпасування димових газів; h'_3 та h''_3 – ентальпія димових газів на вході в утилізатор та виході з нього, відповідно, кДж/кг.

Коефіцієнт байпасування підбирається таким, щоби температура димових газів (або їх суміші) перед димососом $t_r^{\text{см}}$ приблизно на 5°C перевищувала температуру точки роси t_p вхідних газів.

Температуру точки роси димових газів, °C, визначали за формулою

$$t_p = 37,11 \text{ g} [1000d'_r / (3,77 + 0,085\alpha_{\text{вдх}})], \quad (2)$$

де $\alpha_{\text{вдх}}$ – коефіцієнт надлишку повітря у відхідних димових газах.

В результаті вирішення рівняння теплового балансу суміші отримали вираз для коефіцієнта байпасування димових газів поза утилізатором, який використовували і в роботах [10–12]

$$\theta_r = \frac{t_r^{\text{см}} - t_r''}{t'_r - t_r''}, \quad (3)$$

де t'_r і t_r'' – температура димових газів на виході з котла – вході в теплоутилізатор і на виході з теплоутилізатора, відповідно, °C.

З урахуванням теплоємностей сухої частини димових газів $c_{\text{с.г}} = 1$ кДж/кг та водяної пари в них $c_{\text{п}} = 1,97$ кДж/кг для визначення ентальпії димових газів використовували залежність

$$h_{3i} = t_{3i} + (2500 + 1,97t_{3i})d_{Ti},$$

де d_{Ti} – вологовміст димових газів, кг/кг с.г.

«Сухий» режим роботи утилізаторів. В цьому режимі охолодження димових газів в утилізаторі відбувається при постійному вологовмісті, тобто $d'_r = d''_r$. Коефіцієнт байпасування $\theta_r = 0$, а температура охолоджених димових газів $t_r'' = 60^\circ\text{C}$. З урахуванням відповідних перетворень рівняння (1) для «сухого» режиму набуде наступного вигляду

$$q_{\text{к.г}} = t'_r + 1,97d'_r(t'_r - 60) - 60. \quad (4)$$

В розрахунках $q_{\text{к.г}}$ за формулою (4) змінювали температуру димових газів t'_r від 140 до 200°C з інтервалом в 10°C, причому для кожної з них також змінювали і вологовміст d'_r від 0,1 до 0,15 кг/кг с.г з інтервалом в 0,01 кг/кг с.г.

Оскільки встановити безпосередню залежність $q_{\text{к.г}} = f(t'_r)$ не вдалося, тому була визначена умовна питома кількість утилізованої теплоти $q'_{\text{к.г}}$ з урахуванням вологовмісту, що обчислюється за виразом $q'_{\text{к.г}} = q_{\text{к.г}}(1 - d'_r)^{1,4}$ і яка у залежності від t'_r наведена на рис. 1.

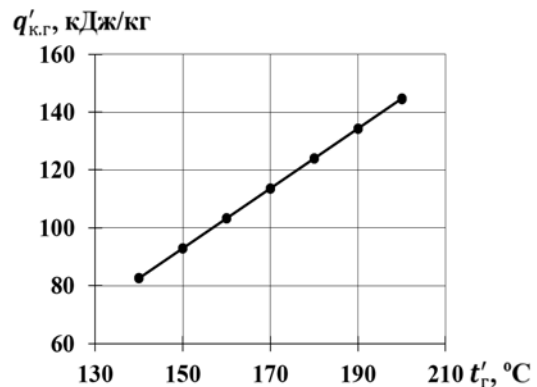


Рис. 1. Залежність $q'_{\text{к.г}}$ від t'_r для «сухого» режиму роботи утилізаторів

В результаті апроксимації розрахункових даних була отримана залежність для визначення умовної питомої кількості теплоти при охолодженні димових газів в «сухому» режимі

$$q'_{\text{к.г}} = 1,0331t'_r - 61,986. \quad (5)$$

Максимальне відхилення розрахункових значень $q'_{\text{к.г}}$ від апроксимальної залежності у всьому діапазоні температур не перевищувало 0,12%.

Для практичного використання отриманих результатів спочатку для заданої температури t'_r за рис. 1 або за залежністю (5) необхідно визначити величину $q'_{\text{к.г}}$, а потім з урахуванням відомого вологовмісту d'_r – питомої кількості утилізованої теплоти, кДж/кг, за формулою

$$q_{\text{к.г}} = \frac{q'_{\text{к.г}}}{(1 - d'_r)^{1,4}}.$$

Режим глибокого охолодження димових газів. Спочатку за формулою (2) визначили тем-

платуру точки роси вхідних димових газів t_p при зміні вологовмісту d'_r від 0,1 до 0,15 г/кг с.г, яка змінюється від 52,5 до 59°C. В подальших розрахунках брали максимальне значення цієї величини, тоді температура суміші, що входить в формулу (3) для θ_r становитиме $t_r^{cm} = 65^\circ\text{C}$.

Надалі визначали величини θ_r у залежності від t_r'' , змінюючи її від 5 до 50°C з інтервалом у 5°C. Для кожної з температур t_r'' розрахунки виконували для різних значень вхідних температур димових газів t_r' від 140 до 200°C з інтервалом 10°C.

Оскільки встановити безпосередню залежність $\theta_r = f(t_r'')$ не вдалося, тому був визначений умовний коефіцієнт байпасування θ'_r з урахуванням вхідної температури димових газів, що обчислюється за виразом $\theta'_r = (1 - \theta_r) / (t_r' + 273)$ і який у залежності від t_r'' наведений на рис. 2.

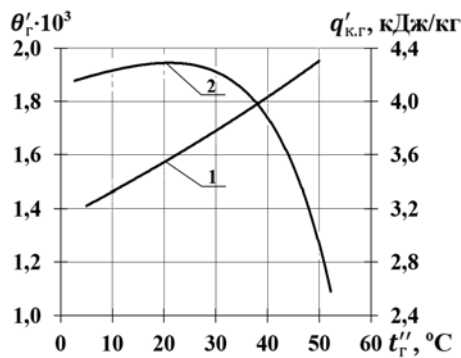


Рис. 2. Залежність θ'_r (1) і $q'_{к.г}$ (2) від t_r'' при глибокому охолодженні димових газів

В результаті апроксимації розрахункових даних була отримана залежність для визначення умовного коефіцієнта байпасування при глибокому охолодженні димових газів

$$(\theta'_r \cdot 10^3) = 1,3611e^{0,0072t_r''} \quad (6)$$

Максимальне відхилення розрахункових значень θ'_r від апроксимальної залежності складає 4,9 % для $t_r'' = 5^\circ\text{C}$ при $t_r' = 140^\circ\text{C}$, для інших комбінацій температур коливається в межах (1,8–3,6) %.

Для практичного розрахунку умовного коефіцієнта байпасування за рис. 2 або за рівнянням (6) для будь-якої температури t_r'' визначається величина θ'_r , потім при заданій температурі t_r' обчислюється коефіцієнт байпасування

$$\theta_r = 1 - \theta'_r / (t_r' + 273) \quad (7)$$

Питома кількість утилізованої теплоти, кДж/кг с.г, при глибокому охолодженні димових газів також визначається за рівнянням (1), яке з урахуванням залежностей ентальпій h'_3 та h''_3 від температур та вологовмістів і відповідних перетворень набуде наступного вигляду

$$q_{3,3} = (1 - \theta_r) [(t_r' - t_r'') + 2500(d_r' - d_r'') + 1,97(d_r' t_r' - d_r'' t_r'')] \quad (8)$$

Розрахунки виконували при $d_r' = 0,13$ кг/кг с.г, а для вологовмісту d_r'' , формула для визначення якого наведена в роботі [10], при $\alpha_{вдх} = 1,15$ отримали залежність

$$d_r'' = 0,003883 e^{0,062t_r''} \quad (9)$$

Надалі змінюючи температури t_r'' при різних значеннях t_r' обчислювали значення $q_{к.г}$, а потім визначили умовну питому кількість утилізованої теплоти за виразом

$$q'_{к.г} = \frac{q_{к.г}}{(t_r'')^{0,85}} \quad (9)$$

В результаті апроксимації розрахункових даних $q'_{к.г}$ від t_r'' (див. рис. 2) була отримана залежність для визначення умовної кількості відведеної від димових газів теплоти при глибокому охолодженні димових газів

$$q'_{к.г} = 4,12 + 0,013 t_r'' - 2,36 \cdot 10^{-4} (t_r'')^2 + 8,74 \cdot 10^{-6} (t_r'')^3 - 5,73 \cdot 10^{-7} (t_r'')^4 + 9,65 \cdot 10^{-9} (t_r'')^5 - 1,14 \cdot 10^{-10} (t_r'')^6 \quad (10)$$

Максимальне відхилення розрахункових значень $q'_{к.г}$ від апроксимальної залежності складає 4,0 % для $t_r'' = 5^\circ\text{C}$ при $t_r' = 140^\circ\text{C}$, для інших комбінацій температур коливається в межах (0,6–2,8) %.

Для практичного використання отриманих результатів спочатку для заданої температури t_r'' за рис. 2 або за залежністю (10) необхідно визначити величину $q'_{к.г}$, а потім з урахуванням відомої температури t_r' – питому кількість утилізованої теплоти, кДж/кг, за формулою

$$q_{к.г} = q'_{к.г} (t_r'')^{0,85} \quad (11)$$

Режим глибокого охолодження димових газів зі зволоженням дуттьового повітря.

Спочатку за формулою (2) визначили температуру точки роси димових газів, яка при $\alpha_{вдх} = 1,15$ та вологовмісту димових газів на вході в теплоутилізатор при зволоженні дуттьового повітря $d_r' = 0,19$ кг/кг с.г [12] становила $t_p = 63^\circ\text{C}$. Тоді температура суміші перед димососом, що входить до формули (3) для визначення коефіцієнта байпасування, дорівнює $t_r^{cm} = 68^\circ\text{C}$.

Аналогічно розрахункам для режиму глибокого охолодження без зволоження дуттьового повітря визначали θ_r та θ'_r . Залежність останнього від t_r'' наведена на рис. 3. В результаті апроксимації розрахункових даних була отримана залежність для визначення умовного коефіцієнта байпасування при глибокому охолодженні димових газів зі зволоженням дуттьового повітря

$$(\theta'_r \cdot 10^3) = 1,3207e^{0,0072t_r''} \quad (12)$$

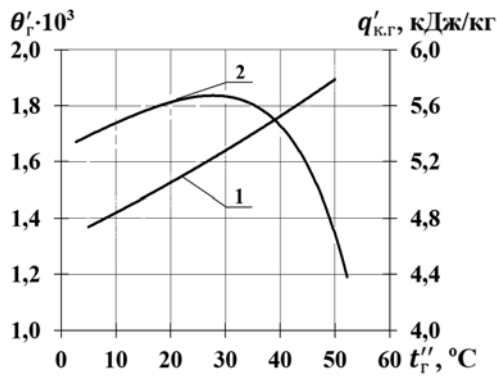


Рис. 3. Залежність θ'_r (1) і $q'_{к.г}$ (2) від t''_r при глибокому охолодженні димових газів зі зволоженням дуттьового повітря

Максимальне відхилення розрахункових значень θ'_r від апроксимальної залежності складає 6,0 % для $t''_r = 5^\circ\text{C}$ при $t'_r = 140^\circ\text{C}$, для інших комбінацій температур коливається в межах (1,9–4,3) %.

Для практичного розрахунку умовного коефіцієнта байпасування за рис. 3 або за рівнянням (12) для будь-якої температури t''_r визначається величина θ'_r , а потім при заданій температурі t'_r за формулою (7) – коефіцієнт байпасування θ_r .

Також за аналогією з попереднім розрахунком режиму без зволоження дуттьового повітря після визначення $q'_{к.г}$ за формулою (9) обчислювали величини $q'_{к.г}$, а в результаті апроксимації розрахункових даних цього параметра від t''_r (див. рис. 3) була отримана залежність для визначення умовної кількості відведеної від димових газів теплоти при глибокому охолодженні димових газів зі зволоженням дуттьового повітря

$$q'_{к.г} = 5,29 + 0,0202 t''_r - 1,82 \cdot 10^{-4} (t''_r)^2 + 8,72 \cdot 10^{-6} (t''_r)^3 - 5,52 \cdot 10^{-7} (t''_r)^4 + 9,34 \cdot 10^{-9} (t''_r)^5 - 1,10 \cdot 10^{-10} (t''_r)^6. \quad (13)$$

Максимальне відхилення розрахункових значень $q'_{к.г}$ від апроксимальної залежності складає 3,8 % для $t''_r = 5^\circ\text{C}$ при $t'_r = 140^\circ\text{C}$, для інших комбінацій температур коливається в межах (0,5–1,7) %.

Для практичного використання отриманих результатів спочатку для заданої температури t''_r за рис. 3 або за залежністю (13) необхідно визначити величину $q'_{к.г}$, а потім з урахуванням відомої температури t'_r – питому кількість утилізованої теплоти, кДж/кг, за формулою (11).

Висновки. 1. В роботі проведений аналіз розрахункових досліджень енергетичної і екологічної ефективності використання поверхневих калориферів для утилізації теплоти димових газів при їх роботі в «сухому» і «мокрому» режимах, у тому числі і зі зволоженням дуттьового повітря.

2. В результаті числових розрахунків отримані узагальнені залежності коефіцієнта байпасування та питомої кількості відведеної від димових газів теплоти у залежності від температури охолоджених димових газів та їх температури на вході в поверхневі утилізатори-калорифери, а також різних значень вологовмісту димових газів. Зазначені залежності отримані для трьох режимів роботи утилізаторів: «сухого», при глибокому охолодженні димових газів, при глибокому охолодженні димових газів зі зволоженням дуттьового повітря.

3. Отримані залежності можуть бути використані в режимі реального часу для визначення можливої максимальної кількості відведеної теплоти, або для регулювання теплопродуктивності утилізаторів у залежності від необхідного потоку теплоти для нагрівання води зовнішніх споживачів.

4. Напрямок подальших досліджень може бути розробка технологічних регламентів експлуатації теплоутилізаційних установок різного типу у залежності від необхідних теплових навантажень споживачів нагрітої води.

Список літератури:

1. Сігал І. Я., Лавренцов Є. М., Сміхула А. В., Марасін О. В., Домбровська Е. П. Енергоефективне обладнання для модернізації газових котлів потужністю 0,1 – 30 МВт. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. № 4. 2021. С. 27–35.
2. Боженко М. Ф., Сало В. П. Енергозбереження в теплопостачанні: навч. посіб. К.: НТУУ «КПІ». 2008. 268 с.
3. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Гнедаш Г. О., Глушак О. Ю. Зменшення вологовмісту димових газів у конденсаційних теплоутилізаторах котельних установок. *Науковий вісник НЛТУ України*. Т. 29. № 8. 2019. С. 116–119. <https://doi.org/10.36930/40290821>.
4. Фіалко Н. М., Пресіч Г. О., Гнедаш Г. О., Навродська Р. О., Новаківський М. О. Технологія утилізації теплоти димових газів з підвищеним вологовмістом для газоспоживальних котлів комунальної енергетики. *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. № 45 (1321). 2018. С. 70–77. doi:10.20998/82413-4295.2018.45.09.
5. Новаківський М. О. Комплексні теплоутилізаційні системи для котлів малої та середньої потужності з підвищеним вологовмістом відхідних газів. автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.06 / ІТТФ НАН України. Київ, 2017. 21 с.

6. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Пресіч Г. О. Дослідження режимів роботи димових труб котелень за умов глибокого охолодження димових газів *Промислова теплотехніка*. Т. 25. № 4. 2003. С. 27–31.
7. Фіалко Н. М., Навродська Р. О., Шевчук С. І., Пресіч Г. О. Аналіз ефективності системи захисту газовідвідних трактів котельних установок при застосуванні теплоутилізаційних технологій. *Промислова теплотехніка*. Т. 38. № 1. 2016. С. 47–53. DOI:10.31472/ihe.1.2016.06.
8. Коржевін А. Д., Боженко М. Ф. Комплексна утилізація теплоти в пароводогрійній котельні системи централізованого теплопостачання. Матеріали XI Міжнародної науково – практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів. Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики. 16-19 квітня 2013 р. Київ: НТУУ «КПІ». Т. 1. С. 137.
9. Боженко М. Ф., Озеруга О. В. Порівняльні характеристики утилізаційних установок димових газів котелень зі зволоженням дуттьового повітря. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. № 1. 2020. С. 79–89. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2020.217572>.
10. Боженко М. Ф., Перевьорткіна І. Я. Каскадна утилізація теплоти димових газів опалювальних водогрійних котелень. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. № 1 (43). 2016. С. 81–88.
11. Боженко М. Ф., Перевьорткіна І. Я. Підвищення ефективності утилізаторів теплоти димових газів котелень за рахунок зволоження дуттьового повітря. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. № 1 (47). 2017. С. 51–57.
12. Боженко М. Ф., Озеруга О. В. Підвищення енергетичної та екологічної ефективності поверхневих теплоутилізаторів димових газів водогрійних котелень. *KPI Science News*. № 1. 2020. С. 7–14. DOI: 10.20535/kpi-sn.2020.1.197948.

Bozhenko M.F., Kamyshnyi B.M. METHODOLOGY FOR DETERMINING THE ENERGY EFFICIENCY OF FLUE GAS HEAT UTILIZATION IN BOILER PLANTS

The article is dedicated to the development of energy-saving measures in boiler plants of centralized and moderately centralized heating systems, namely – the utilization of heat from flue gases of water-heating and steam boilers when burning natural gas. Surface or contact type heat recovery units can be operated in “dry” or “wet” modes. In the first mode, only the “explicit” heat flow is removed from the flue gases, and their cooling occurs at a constant moisture content to a temperature that is approximately 5°C higher than the dew point temperature. In the “wet” mode, deep cooling of the flue gases occurs to temperatures lower than the dew point temperature, with both “explicit” and “latent” heat flows being removed. Increasing the efficiency of heat exchangers with deep cooling of flue gases is also possible with the humidification of combustion air. The heat recovered in heat recovery units can be effectively used for heating water for the internal needs of the boiler plants (raw or chemically treated), hot water supply to consumers, return water of the heating networks, etc. An analysis of the comparative efficiency of surface and contact heat exchangers, carried out at the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, showed that from an economic point of view, heat exchangers-radiators are the most efficient in terms of minimal total costs. The study provides a generalization of previous research on the energy efficiency of surface radiators installed with water-heating boilers operating in “dry” and “wet” modes, including with air humidification. As a result of numerical calculations, generalized dependencies of the bypass coefficient and the specific amount of heat removed on the temperatures of the flue gases at the outlet and the temperatures and moisture content at the inlet were obtained. The calculations were carried out for three operating modes of the heat exchangers: “dry”, with deep cooling of flue gases, and with deep cooling of flue gases with air humidification. The obtained dependencies can be used in real-time mode to determine the maximum possible amount of heat removed, or to regulate the heat productivity of the heat exchangers depending on the required heat flow for heating water for external consumers.

Key words: boiler, flue gases, temperature, heat exchanger, heat quantity, bypass coefficient, water, energy efficiency.

Бошкова І.Л.

Одеський національний технологічний університет

Волгушева Н.В.

Одеський національний технологічний університет

Канауз К.О.

Одеський національний технологічний університет

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СУШІННЯ ЗЕРНА ВІВСА ПРИ МІКРОХВИЛЬНО-КОНВЕКТИВНОМУ ПІДВОДІ ЕНЕРГІЇ

Досліджуються циклічні режими мікрохвильово-конвективного сушіння нерухомого шару зерен вівса. Проведено аналіз публікацій за темою досліджень сушіння із застосуванням енергії мікрохвильового поля та його комбінацією з конвективним сушінням. Встановлено перспективність сушіння із застосуванням мікрохвильової енергії, однак для створення відповідних технологій бракує відомостей щодо швидкості сушіння та обґрунтованості вибору раціонального способу підведення теплоти. Сформульовано завдання отримання даних за швидкостями сушіння зерна при циклічному мікрохвильово-конвективному підведенні теплоти та вибору раціонального режиму за значеннями питомих (на кілограм випареної вологості) витрат енергії. Представлена схема експериментальної установки, яка дозволяє вивчити вплив тривалості продування та температури повітря на закономірності зміни температур і вмісту вологи матеріалу, швидкість сушіння та питомі енерговитрати. Наведено методику проведення експерименту та основні залежності для обробки експериментальних даних. Проведено аналіз результатів експериментів під час продування шару зерна повітрям без попереднього підігріву та нагрітому до 50°C. Тривалість циклів продування шару зерна становила 10, 20 і 30 с, тривалість мікрохвильового нагріву для всіх дослідів дорівнювала 10 с. Отримано значення швидкості сушіння для періодів мікрохвильового та конвективного підведення енергії, а також середніх значень швидкості сушіння для кожного досліді. Проведено порівняльний аналіз швидкостей сушіння для періодів як мікрохвильового нагріву, так і конвективного при різній тривалості циклів продування. Отримано результати розрахунків питомих витрат енергії за різних умов циклічного сушіння. Визначено умови отримання мінімальних питомих витрат енергії (на кілограм випарованої вологи) та максимальної швидкості сушіння.

Ключові слова: циклічні режими, щільний шар, експериментальна установка, тривалість продування, температура, вологовміст, швидкість сушіння, питомі витрати енергії.

Постановка проблеми. Найбільш енергоємною технологічною операцією при післязбиральній обробці зерна є теплове сушіння. В даний час для сушіння зернових зазвичай використовуються конвективні сушарки, що мають ряд недоліків, які можуть бути частково усунені при переході на мікрохвильово-конвективний спосіб підведення теплоти. Як показує сучасна практика, спроби створення нового обладнання, зокрема, з використанням енергії мікрохвильового поля без попереднього дослідження кінетики сушіння не призводили до бажаного результату. Основою для конструювання нових установок є залежності для розрахунку температури та вмісту вологості дисперсного матеріалу в процесі сушіння, що є предметом дослідження даної роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Свіжозібране зерно необхідно висушити до вологості

14% або менше протягом 48 годин, щоб запобігти проростанню та псуванню [1]. Більшість досліджень просушування зерна проводяться в лабораторних умовах для вивчення факторів, які визначають якість зерна при переході на великі масштаби. До таких факторів належать температура та потік повітря, товщина шару зерна, склад сировини та використовувана система сушіння [2]. Дослідження МХ-конвективного сушіння зерна [3] показали, що тривалість процесу сушіння за наявності осцилюючого мікрохвильового енергопідведення скорочується в 3,5 рази порівняно з конвективним сушінням. При дослідженні кінетики сушіння зерна отримано переконливі докази доцільності застосування мікрохвильових технологій та доцільності розробок мікрохвильових сушарок [4, 5].

У [6] підкреслюється необхідність вивчення кінетики сушіння для подальшого прогнозування вологовмісту та швидкості сушіння при проектуванні промислових сушарок. Порівняльна оцінка кінетики конвективного та мікрохвильового сушіння наведена у [7], результати свідчать про доцільність використання мікрохвильової енергії. Експериментальне дослідження сушіння зерен неочищеного рису [8] у мікрохвильовому полі показало перспективність мікрохвильового способу сушіння, авторами визначені раціональні умови взаємодії мікрохвильового поля з шаром матеріалу. Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить про інтерес до розробки технологій сушіння зернових матеріалів за використання мікрохвильової енергії, проте для створення відповідних технологій бракує відомостей щодо швидкості сушіння та обґрунтованості вибору раціонального способу підведення теплоти.

Метою роботи є отримання даних за швидкостями сушіння зерна при циклічному мікрохвильово-конвективному підведенні теплоти та обґрунтування вибору раціонального режиму за значеннями питомих (на кілограм випареної вологості) витрат енергії.

Виклад основного матеріалу. Експериментальна установка та методика проведення експериментів

Схему експериментальної установки представлено на рис. 1. Установка забезпечує проведення досліджень при мікрохвильовому, мікрохвильово-конвективному та конвективному сушінні. У середині робочої камери встановлений повітропровід з радіопрозорого матеріалу, в який поміщалася комірка, виготовлена у формі паралелепіпеда з радіопрозорого сітчастого матеріалу. Розміри осередку відповідали розмірам повітроводу, щоб при продуванні матеріалу повітрям не відбувалося бічних перетікань.

Вивчається вплив тривалості продування τ_k , а також температури повітря, що продуває шар, на закономірності зміни температур і вмісту вологи матеріалу, швидкості сушіння і питомі енерговитрати. При цьому тривалість включення магнетрону τ_{MX} у всіх дослідках була однаковою. При продуванні ненагрітим повітрям проводяться 3 серії дослідів, що відрізняються тривалістю τ_k . Після кожного кроку проводиться зважування матеріалу і вимірювання температури шару в декількох точках, потім в комірку засипається нова порція матеріалу з тією ж вагою і вмістом вологи, і дослід проводиться з тривалістю, більшою на наступний період (MX або продування). Таким чином,

отримані вихідні дані дозволяють визначити спад вологи і середню температуру шару, а також розрахувати вміст вологи, питомі витрати енергії після кожного з періодів. Кожен дослід закінчується паузою. У дослідках вимірюють початкові та кінцеві маси (m_0, m_k) та температури (t_0, t_k) та тривалість продування (τ_k).

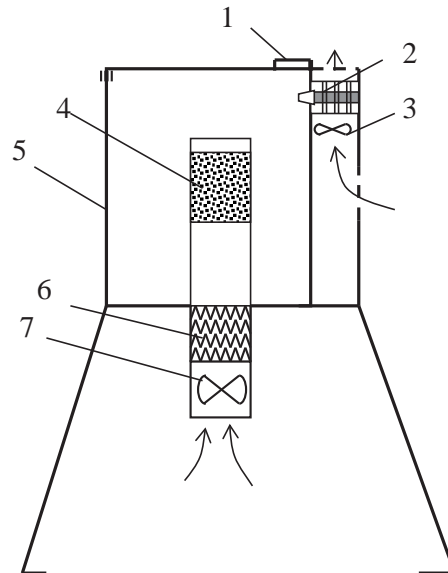


Рис. 1. Схема установки для дослідження кінетики сушіння зернових матеріалів [4]

- 1 – дверцята, 2 – магнетрон, 3 – вентилятор системи охолодження магнетрону,
- 4 – експериментальна комірка з матеріалом для досліджень, 5 – робоча камера,
- 6 – електронагрівач, 7 – вентилятор

У мікрохвильову установку завантажувалося 0,1 кг зерна з початковим вмістом вологи 0,2 кг/кг. Сушіння зерна проходило в циклічному режимі – періоди MX нагрівання чергувалися з періодами продування. Тривалість періоду MX нагріву у всіх дослідках була однаковою і становила 10 с, потужність магнетрону 600 Вт. Тривалість періоду продування була 10, 20 та 30 с. Температура повітря становила 20°C, швидкість фільтрації у шарі зерна 1 м/с. Початкова температура зерна становила 20°C.

При обробці даних визначають такі величини:

– спад вологи: $\Delta m = m_0 - m_k$, кг, (1)

– початковий і кінцевий вміст вологовміст :

$$u_0 = \frac{m_0}{m_{\text{сух}}}, \quad u_k = \frac{m_k}{m_{\text{сух}}}, \text{ кг/кг} \quad (2)$$

де $m_{\text{сух}}$ – маса абсолютно сухого матеріалу,

– швидкість сушіння:

$$N = \frac{u_0 - u_k}{\tau_{\Sigma}}, \text{ кг/(кг}\cdot\text{с)}, \quad (3)$$

– загальну тривалість процесу сушіння:

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{MX} \cdot n_{MX} + \tau_k \cdot n_n, \text{ с} \quad (4)$$

– сумарні енерговитрати:

$$Q_{\Sigma} = P_M \cdot \tau_{MX} \cdot n_{MX} + P_{\text{вент}} \cdot \tau_k \cdot n_k, \text{ Дж} \quad (5)$$

У дослідах з продуванням нагрітим повітрям розрахунок проводиться за наведеною вище методикою, однак сумарні енерговитрати враховують також кількість теплоти, яка була витрачена на нагрівання повітря:

$$Q_{\Sigma} = P_M \cdot \tau_{MX} \cdot n_{MX} + P_{\text{вент}} \cdot \tau_k \cdot n_k + G_{\text{пов}} \cdot c_{p,\text{пов}} \cdot (t_{\text{пов}}^k - t_c) \cdot \tau_k, \text{ Дж} \quad (6)$$

– корисний тепловий потік, витрачений на випаровування вологи та нагрівання матеріалу:

$$Q_{\text{кор}} = \Delta m \cdot r + \frac{m_0 + m_k}{2} c_{\text{вол.м}} (t_k - t_0), \text{ Дж} \quad (7)$$

де $c_{\text{вол.м}}$ – теплоємність вологого матеріалу, Дж/(кг·К)

– питомі енерговитрати:

$$q_{\text{пит}} = \frac{Q_{\Sigma}}{\Delta m}, \text{ Дж/кг.вол} \quad (8)$$

Оцінка характеристик сушіння проводилася до досягнення середнього кінцевого вмісту вологи. $u_k = 0,144$ кг/кг.

Результати експериментальних досліджень сушіння зерна при МХ-конвективному циклічному підведенні енергії

Продування шару зерна повітрям без попереднього підігріву

Метою досліджень було визначення впливу тривалості продування шару зерна ненагрітим повітрям на кінетику сушіння та енерговитрати, а також доцільність такого продування.

На рис. 2 представлено зміну швидкості сушіння в періоди МХ підведення теплоти та продування за циклами при $\tau_{\text{коне}} = 10$ с (загальна тривалість процесу – 130 с, число циклів – 6,5, швидкість повітря 1 м/с).

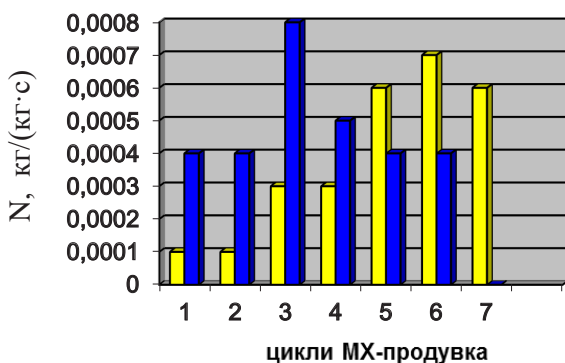


Рис. 2. Зміна швидкості сушіння N протягом досвіду під час продування повітрям без попереднього підігріву $\tau_{\text{коне}} = 10$ с

■ – тривалість МХ нагріву 10 с, ■ – тривалість продування 10 с

Питомі витрати енергії за весь дослід становили 9,07 МДж/кг, середня швидкість сушіння за весь період $N = 4,3 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с). Середня швидкість МХ

сушіння $N_{MX} = 3,43 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с), середня швидкість за періоди продування $N_k = 4,83 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с).

На рис. 3 представлено зміну швидкості сушіння в періоди МХ підведення теплоти та продування за циклами при $\tau_{\text{коне}} = 20$ с.

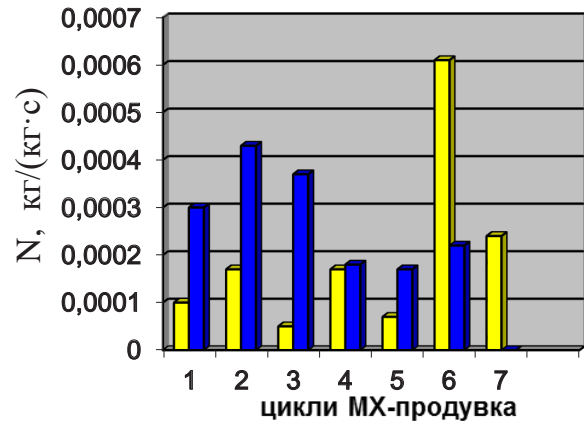


Рис. 3. Зміна швидкості сушіння протягом досвіду під час продування повітрям без попереднього підігріву $\tau_{\text{коне}} = 20$ с

■ – тривалість МХ нагріву 10 с, ■ – тривалість продування 20 с

Під час продування ненагрітим повітрям $\tau_k = 20$ с. (загальна тривалість процесу – 190 с, число циклів – 6,5) питомі витрати енергії за весь дослід склали 9,68 МДж/кг, швидкість сушіння $N = 2,74 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с). Середня швидкість МХ сушіння $N_{MX} = 2,01 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с), середня швидкість під час продування $N_k = 2,78 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с).

На рис. 4 представлено зміну швидкості сушіння в періоди МХ підведення та продування за циклами при $\tau_{\text{коне}} = 30$ с.

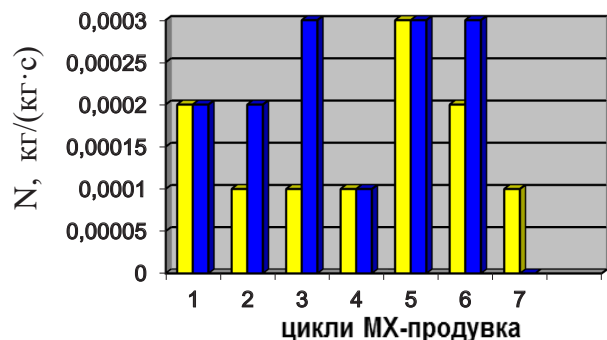


Рис. 4. Зміна швидкості сушіння протягом досвіду під час продування повітрям без попереднього підігріву $\tau_{\text{коне}} = 30$ с

■ – тривалість МХ нагріву 10 с, ■ – тривалість продування 30 с

Під час продування холодним повітрям при $\tau_k = 30$ с. загальна тривалість дослід – 250 с, число циклів – 6,5. Питомі витрати енергії за весь дослід становили 8,96 МДж/кг, швидкість

сушіння $N = 2,24 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с). Середня швидкість МХ сушіння $N_{MX} = 1,57 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с), середня швидкість під час продування $N_k = 2,33 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с).

Швидкість сушіння в періоди продування ненагрітим повітрям зі збільшенням їхньої тривалості зменшується. Так, при співвідношенні 10 с МХ – 10 с продування середня швидкість сушіння становила $4,1 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с), при 10 с МХ – 20 с продування середня швидкість сушіння становила $2,6 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с), при 10 с МХ – 30 с продування середня швидкість сушіння становила $2,0 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с). Це пояснюється помітним зниженням температури матеріалу під час продування не нагрітим повітрям.

Питомі енерговитрати під час продування зневажливо малі. При збільшенні τ_k з 10 с до 30 с питомі енерговитрати практично не змінилися.

Продування шару зерна нагрітим повітрям

Результати отримані в умовах продування шару повітрям, нагрітим до температури повітря $= 50^\circ\text{C}$. Початкова температура зерна становила $t_{\text{зерна}} = 20^\circ\text{C}$, потужність магнетрону $P_c = 600$ Вт. Тривалість періоду підведення мікрохвильової енергії завжди становила 10 с. Зерновий матеріал – овес.

При $t_{\text{пов}} = 50^\circ\text{C}$ зерно було перегріте вище припустимого значення: при $\tau_k = 10$ с кінцева температура складала 95°C , при $\tau_k = 20$ с кінцева температура 91°C .

На рис. 5 представлено зміну швидкості сушіння в періоди МХ підведення та продування нагрітим повітрям по циклах при $\tau_k = 10$ с.

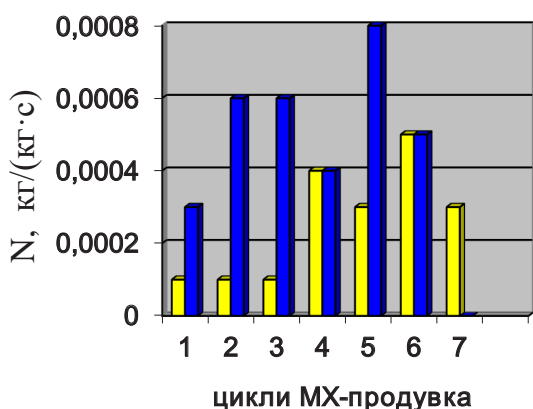


Рис. 5. Зміна швидкості сушіння протягом досвіду під час продування нагрітим повітрям $\tau_{\text{ковн}} = 10$ с

■ – тривалість МХ нагріву 10 с, ■ – тривалість продування 10 с

При продуванні з періодом $\tau_k = 10$ с (тривалість досвіду 130 с, кількість періодів 6,5, швидкість повітря 1 м/с, витрата 0,0118 кг/с) питомі витрати енергії за весь досвід склали 11,72 МДж/кг, середня швидкість сушіння $3,8 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с). Середня швидкість МХ сушіння

$N_{MX} = 2,57 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с), середня швидкість під час продування $N_n = 5,33 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с).

На рис. 6 представлено зміну швидкості сушіння в періоди МХ підведення та продування нагрітим повітрям по циклах при $\tau_k = 20$ с.

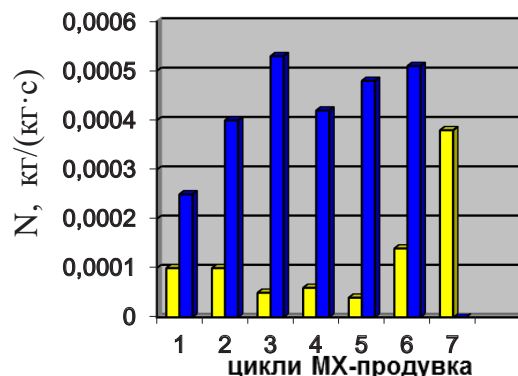


Рис. 6. Зміна швидкості сушіння протягом досвіду під час продування нагрітим повітрям $\tau_k = 20$ с

■ – тривалість МХ нагріву 10 с, ■ – тривалість продування 20 с

При продуванні нагрітим повітрям з періодом $\tau_k = 20$ с (тривалість досвіду 190 с, кількість періодів 6,5, швидкість повітря 1 м/с, витрата 0,0118 кг/с) питомі витрати енергії протягом усього досвіду становили 14,33 МДж/кг. Середня швидкість МХ сушіння $N_{MX} = 1,24 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с), середня швидкість під час продування $N_k = 4,32 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с). Середня швидкість сушіння за дослід становила $N = 3,8 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с).

Результат зіставлення даних за швидкістю сушіння при продуванні ненагрітим повітрям наступний: при тривалості МХ нагріву 10 с і тривалості продування 10 с середня швидкість МХ сушіння $N_{MX} = 3,43 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с), середня швидкість під час продування $N_k = 4,83 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с); при тривалості МВ нагрівання 10 с та тривалості продування 20 с $N_{MX} = 2,01 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с), середня швидкість під час продування $N_k = 2,78 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с), при тривалості МХ нагрівання 10 с та тривалості продування 30 с $N_{MX} = 1,57 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с), середня швидкість під час продування $N_k = 2,33 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с). У всіх цих дослідах середня швидкість сушіння при продуванні вище, ніж при МХ нагріванні. При цьому збільшення тривалості продування призводить до зменшення швидкості сушіння як під час МХ підведення енергії, так і в період продування. Питомі витрати приблизно рівні. Таким чином, перший режим є кращим.

Аналіз даних по сушінню нагрітим повітрям: при тривалості МХ нагрівання 10 с та тривалості продування 10 с середня швидкість МХ сушіння $N_{MX} = 2,57 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с), середня швидкість під час продування $N_k = 5,33 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с);

при тривалості МХ нагрівання 10 с та тривалості продування 20 с середня швидкість МХ сушіння $N_{MX} = 1,24 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с), середня швидкість під час продування $N_{\kappa} = 4,32 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с). Так як швидкість сушіння в першому випадку була вищою, а питомі витрати нижче, то цей режим є кращим.

Висновки. Питомі енерговитрати були мінімальними $q_{\text{пит}} = 9,07$ МДж/кг у режимі продування шару зерна повітрям без попереднього підігріву з періодом $\tau_{\kappa} = 10$ с, при цьому швидкість сушіння становила $N = 4,3 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с). Максимальні питомі енерговитрати $q_{\text{пит}} = 14,33$ МДж/кг відповідали режиму продування нагрітим повітрям $t_{\text{нов}} = 50$ °С при $\tau_{\kappa} = 20$ с. Швидкість сушіння склала $N = 2,94 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с). Швидкість сушіння

в періоди продування ненагрітим повітрям зі збільшенням їхньої тривалості зменшується. Це пояснюється помітним зниженням температури матеріалу під час продування повітрям.

Питомі енерговитрати були мінімальними $q_{\text{пит}} = 9,07$ МДж/кг у режимі продування шару зерна повітрям без попереднього підігріву з періодом $\tau_{\kappa} = 10$ с, при цьому швидкість сушіння становила $N = 4,3 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с). Максимальні питомі енерговитрати $q_{\text{пит}} = 14,33$ МДж/кг відповідали режиму продування нагрітим повітрям $t_{\text{нов}} = 50$ °С при $\tau_{\kappa} = 20$ с. Швидкість сушіння склала $N = 2,94 \cdot 10^{-4}$ кг/(кг·с). Швидкість сушіння в періоди продування ненагрітим повітрям зі збільшенням їхньої тривалості зменшується. Це пояснюється помітним зниженням температури матеріалу під час продування повітрям.

Список літератури:

1. Martin-Gatton College of Agriculture, Food and Environment URL: <http://www2.ca.uky.edu/agcomm/pubs/id/id125/10.pdf>.
2. Ziegler V., Paraginski RT, Ferreira CD. Concilium. 2023. Vol. 23, no. 8. P. 37–56. URL: <https://doi.org/10.53660/clm-1249-23e13>.
3. Kalender'yan VA, Boshkova IL, Volgusheva NV Kinetics of microwave dring of free-flowing organic material. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2006. Vol. 79, no. 3. P. 547–552. URL: <https://doi.org/10.1007/s10891-006-0133-y>
4. Волгушева Н. В., Угольников О. П. Кінетика мікрохвильового сушіння зерна у нерухомому кулі. Refrigeration Engineering та Technology. 2023. Т. 59, № 2. С. 128–135. URL: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i2.2633>.
5. Acierno D., Barba AA, d'Amore M. Heat transfer phenomena під час процесування матеріалів з microwave energy. Heat and Mass Transfer. 2003. Vol. 40, no. 5. P. 413–420. URL: <https://doi.org/10.1007/s00231-003-0482-4>.
6. Al-Ali M., Parthasarathy R. Modeling and kinetics study novel microwave irradiation dring of naproxen sodium drug. // Powder Technology. 2019. Vol. 345. P. 766–774.
7. Охорона повітря і мікрохвильова продукція кінетики білих кавалків (*Brassica oleraceae* L. var *capitata* L.): Modelling, thermodynamic properties, energy consumption and reconstitution kinetics / BS Luka et al. // Journal of Agriculture and Food Research. 2023. P. 100–605.
8. Heat and Mass Transfer на Microwave Drying of Rough Rice Grains: An Experimental Analysis / EG Silva et al. // Agriculture. 2020. Vol. 11, no. 1. P. 8.

Boshkova I.L., Volgusheva N.V., Kapauz K.O. EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF OAT GRAIN DRYING WITH MICROWAVE-CONVECTIVE HEATING

Cyclic modes of microwave-convective drying of a stationary layer of oat grains are studied. An analysis of publications on the topic of research on drying with the use of microwave field energy and its combination with convective drying was carried out. The perspective of drying with the use of microwave energy has been established, however, for the creation of appropriate technologies, there is a lack of information on the speed of drying and the validity of choosing a rational method of heat supply. The task of obtaining data on grain drying rates during cyclic microwave-convective heat supply and choosing a rational mode based on the values of specific (per kilogram of evaporated moisture) energy consumption is formulated. The scheme of the experimental installation is presented, which allows studying the influence of the duration of blowing and air temperature on the patterns of changes in temperature and moisture content of the material, drying speed and specific energy consumption. The method of conducting the experiment and the main dependencies for processing experimental data are presented. An analysis of the results of experiments during blowing the grain layer with air without preheating and heated to 50 °C was carried out. The duration of cycles of blowing the grain layer was 10, 20 and 30 s, the duration of microwave heating for all experiments was equal to 10 s. The value of the drying speed for the periods of microwave and convective energy input, as well as the average values of the drying speed for each experiment, were obtained. A comparative analysis of drying rates for periods of both microwave heating and convective heating at different durations of blowing cycles was carried out. The results of calculations of specific energy consumption under different cyclic drying conditions were obtained. The conditions for obtaining the minimum specific energy consumption (per kilogram of evaporated moisture) and the maximum drying speed have been determined.

Key words: cyclic modes, dense layer, experimental setup, blowing duration, temperature, moisture content, drying speed, specific energy consumption.

УДК 697.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/08>**Кутний Б.А.**

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Чернецька І.В.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Шнейдер С.В.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ТА ГЕЛІОКОЛЕКТОРІВ ДЛЯ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО БУДИНКУ

Використання систем сонячного теплопостачання є одним із найперспективніших способів генерації енергії для теплопостачання будинків. Основними причинами, що стримують впровадження геліосистем в Україні, є високий рівень початкових капітальних витрат, добова та сезонна нерівномірність виробництва сонячної енергії, а також жорстка залежність від кліматичних умов. У той же час все гострішою стає проблема необхідності впровадження альтернативних надійних джерел енергії, здатних забезпечити автономне функціонування систем опалення та гарячого водопостачання будинків без використання традиційних високовартісних дефіцитних енергоносіїв. Перебої з електропостачанням спонукають до пошуку нових надійних джерел енергії.

Основними видами геліосистем, що забезпечують теплопостачання будинків є фотоелектричні панелі та сонячні колектори. Відповідно виникає питання щодо доцільності та економічної ефективності встановлення тієї чи іншої системи. Дана робота присвячена порівняльному аналізу фотоелектричних сонячних панелей та вакуумних колекторів для потреб теплопостачання індивідуального житлового будинку в Україні. Виконано розрахунок теплової енергії для потреб опалення будинку в умовах м. Київ, підібрано необхідне технологічне обладнання геліосистем для покриття розрахункового навантаження та обчислено економію коштів на оплаті енергоносіїв за опалювальний сезон при використанні сонячних систем теплопостачання. Визначено вартість геліосистем, які виконано із застосуванням вакуумних колекторів та фотоелектричних модулів, проведено аналіз їх термінів окупності.

Ключові слова: сонячна енергія, геліосистема, фотоелектричні панелі, сонячний колектор, опалення будинку, сонячне теплопостачання, термін окупності, теплоенергетика.

Постановка проблеми. У багатьох промислово розвинених країнах де резерви власного органічного палива сильно вичерпані або взагалі відсутні та енергетика яких базується на імпорتنих енергоносіях, питання використання нетрадиційних і поновлюваних джерел енергії стають все більш актуальними. Активно ведуться роботи по їх застосуванню в приватному будівництві та енергетиці нашої держави навіть під час війни.

В Україні розвиваються два напрямки використання сонячної енергії, які пов'язані з отриманням теплоти для гарячого водопостачання та опалення. Для одного напрямку джерелом теплоти є плоскі або трубчасті геліоколектори, для іншого – фотоелектричні панелі. Відповідно постає питання про доцільність застосування систем першого чи другого типу, що може бути оцінено на основі порівняння ефективності їх роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Традиційною схемою більшості систем сонячного теплопостачання приватних будинків є схема двоконтурної геліосистеми нагрівання води з використанням сонячних колекторів та акумуляцією отриманої енергії в баку-акумуляторі. Фотоелектричні панелі у більшості випадків застосовуються як елемент сонячної електростанції (СЕС) для продажу державі електричної енергії [1, 2]. З урахуванням клімату України, обов'язковою умовою для практичного використання систем сонячного теплопостачання є встановлення резервного (додаткового) джерела енергії, наприклад, котла [3].

Важливим показником при визначенні ефективності роботи геліосистеми є розрахунок коефіцієнта заміщення палива як частки навантаження на опалення, яке забезпечується за рахунок сонячної

енергії [3]. Ефективне використання означає, що геліоустановка може забезпечити потреби споживачів в опаленні до 25%. Кількість теплоти, що може бути прийнята сонячними колекторами чи панелями в містах України визначають згідно з даними [4] та методикою, описаною в [5]. Приблизний простий термін окупності геліоустановки визначають як відношення вартості геліосистеми до сезонної зекономленої суми оплати за енергоспоживання при використанні сонячної установки.

Метою статті є порівняння на основі теплотехнічних та економічних розрахунків ефективності застосування фотоелектричних сонячних панелей та вакуумних сонячних колекторів для енергозабезпечення системи тепlopостачання індивідуального житлового будинку.

Виклад основного матеріалу. Вихідним об'єктом дослідження є індивідуальний дво-поверховий житловий будинок, розташований у м. Київ. Опалювальна площа будівлі – 117,7 м², опалювальний об'єм – 346,8 м³. Основним джерелом теплоти в будинку є електричний котел.

Розрахункові зовнішні середні місячні температури ($t_{\text{ср.міс}}$) взяті згідно ДСТУ Н.Б.В.1-27.2010 «Будівельна кліматологія», табл. 2 [4]. Тепловтрати будинку пораховано згідно стандарту EN 12831:2003 [6].

Витрату теплової енергії по кожному місяцю опалювального періоду пораховано згідно формули, кВт×год:

$$Q_{\text{міс}} = \Phi_i \cdot 24 \cdot n_{\text{діб}}, \quad (1)$$

де Φ_i – середньомісячне теплове навантаження будинку, кВт;

$n_{\text{діб}}$ – число днів у місяці, діб.

Результати розрахунку витрат теплової енергії наведено в таблиці 1.

Таблиця 1
Результати розрахунку витрати теплової енергії для потреб опалення будинку

Назва місяця	$n_{\text{діб}}$	$t_{\text{ср.міс}}, \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Phi_i, \text{ кВт}$	$Q_{\text{міс}}, \text{ кВт}\times\text{год}$
Січень	31	-4,7	6,991	5201
Лютий	28	-3,6	6,702	4504
Березень	31	1,0	5,492	4086
Листопад	30	1,9	5,254	3783
Грудень	31	-2,5	6,413	4771
Всього:				22345

Для порівняння ефективності використано сонячний вакуумний колектор Atmosfera СВК-А 20 [7] із площею теплосприймаючої поверхні (S_k) 1,6 м², коефіцієнтом корисної дії (ККД) 92% та

сонячну фотоелектричну батарею LongiSolar LR5-54НІН-410М [8] з $S_k = 1,95 \text{ м}^2$, ККД = 21%.

Кількість теплоти, що може бути прийнята сонячними колекторами чи панелями на широті м. Київ визначено згідно з даними ДСТУ Н.Б.В.1-27.2010 [4]. Розрахунок середньомісячної сумарної кількості сонячної енергії, яка надходить (E_n) і сприймається (E_k) похилою поверхнею сонячного колектора та фотоелектричної батареї наведено на рисунках 1, 2.

Згідно результатів розрахунку для ефективного використання сонячних вакуумних колекторів для потреб опалення будинку потрібно 15 шт., а фотоелектричних панелей – 53 шт.

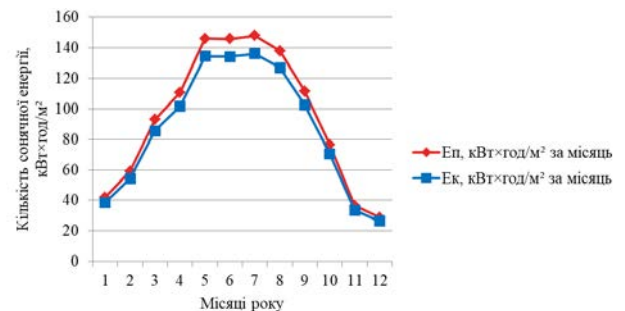


Рис. 1. Ілюстрація виконаних розрахунків для 1 м² сонячного вакуумного колектора

Ступінь заміщення палива за опалювальний сезон для обох випадків пораховано згідно формули:

$$f^{\text{сез}} = \frac{Q_{\text{С}}^{\text{СЕЗ}}}{Q_{\text{Н}}^{\text{СЕЗ}}}, \quad (2)$$

де $Q_{\text{С}}^{\text{СЕЗ}}$ – сезонна к-сть теплоти, яка забезпечується геліосистемою, кВт×год;

$Q_{\text{Н}}^{\text{СЕЗ}}$ – сезонна величина теплового навантаження для потреб опалення будинку; $Q_{\text{Н}}^{\text{СЕЗ}} = 22345 \text{ кВт}\times\text{год}$, згідно таблиці 1.

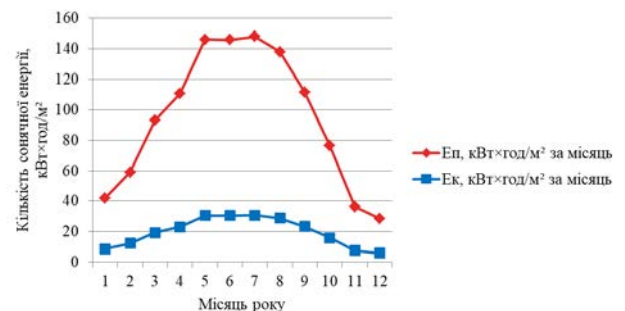


Рис. 2. Ілюстрація виконаних розрахунків для 1 м² сонячної фотоелектричної батареї

Згідно формули (2) ступінь заміщення палива для геліосистеми з 15-ти сонячних вакуумних колекторів складає:

$$f^{\text{сез}} = \frac{5736}{22345} = 0,26$$

Ступінь заміщення палива для геліосистеми з 53-ох сонячних фотоелектричних панелей складає:

$$f^{сез} = \frac{5580,9}{22345} = 0,25$$

Отже, умова ефективного використання в покритті теплового навантаження для опалення будинку виконана.

При порівнянні ефективності застосування сонячних установок їх термін окупності повинен бути менше терміну служби сонячного колектора чи сонячної батареї (25 років). У разі підвищення тарифів на електроенергію протягом терміну служби геліосистеми період окупності зменшиться [3].

У розрахунку використано схему системи сонячного теплопостачання з акумуляцією отриманої енергії (рис. 3).

Згідно ДСТУ-Н Б В.2.5-43:2010 [9] ємність бака-акумулятора ($V_{БА}$) для систем із примусовою циркуляцією визначають відповідно до площі сонячних колекторів (СК) із розрахунку $0,06-0,08 \text{ м}^3$ на 1 м^2 СК (менші значення рекомендовані для I зони). Так як згідно ДБН В.2.6-31:2021 [10] м. Київ знаходиться в I температурній зоні, то взято значення $0,06 \text{ м}^3/\text{м}^2$ і виконано розрахунок за формулою, м^3 :

$$V_{БА} = S_{п} \cdot 0,06, \quad (3)$$

де $S_{п}$ – площа поглинаючої поверхні СК, м^2 .

Площа поглинаючої поверхні СК знайдена за залежністю, м^2 :

$$S_{п} = S_{к} \cdot n_{шт} \quad (4)$$

де $S_{к}$ – площа абсорбера одного колектора Atmosfera СВК-А 20, $S_{к} = 1,6 \text{ м}^2$ [7];

$n_{шт}$ – кількість сонячних колекторів згідно результатів розрахунку, $n_{шт} = 15$ шт.;

$$S_{п} = 1,6 \cdot 15 = 24 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Після підстановки вихідних даних у формулу (3), отримуємо:

$$V_{БА} = 24 \cdot 0,06 = 1,44 \text{ (м}^3\text{)}.$$

Обрано теплоакумулятор ЕкоЕнергія АБ-1600 1В об'ємом – 1600 л з нижнім теплообмінником потужністю 25 кВт [11].

Величину необхідної потужності насоса 185 Вт визначено залежно від площі сонячного колектора. Обрано циркуляційний насос Wilo TOP-S 25/7 DM потужністю 195 Вт [12] та контролер для систем сонячного нагріву води Altek, Atmosfera: SR618C6 [13].

Економічний ефект від застосування геліоколекторів оцінимо за економією електричної енергії на роботу системи гарячого водопостачання, оскільки саме вона складатиме основне навантаження.

Добові витрати електроенергії для нагрівання води в баку-акумуляторі при застосуванні електричного нагрівача, пораховано за формулою, кВт×год:

$$W_{ЕЛ} = \frac{V_{БА} \cdot \rho_{в} \cdot c_{в} \cdot (t_{ГВ} - t_{ХВ})}{3600} \quad (5)$$

де $\rho_{в}$ – густина води, кг/л; $c_{в}$ – питома теплоємність води, кДж/кг·°С;

$t_{ГВ}, t_{ХВ}$ – температура гарячої і холодної води, °С.

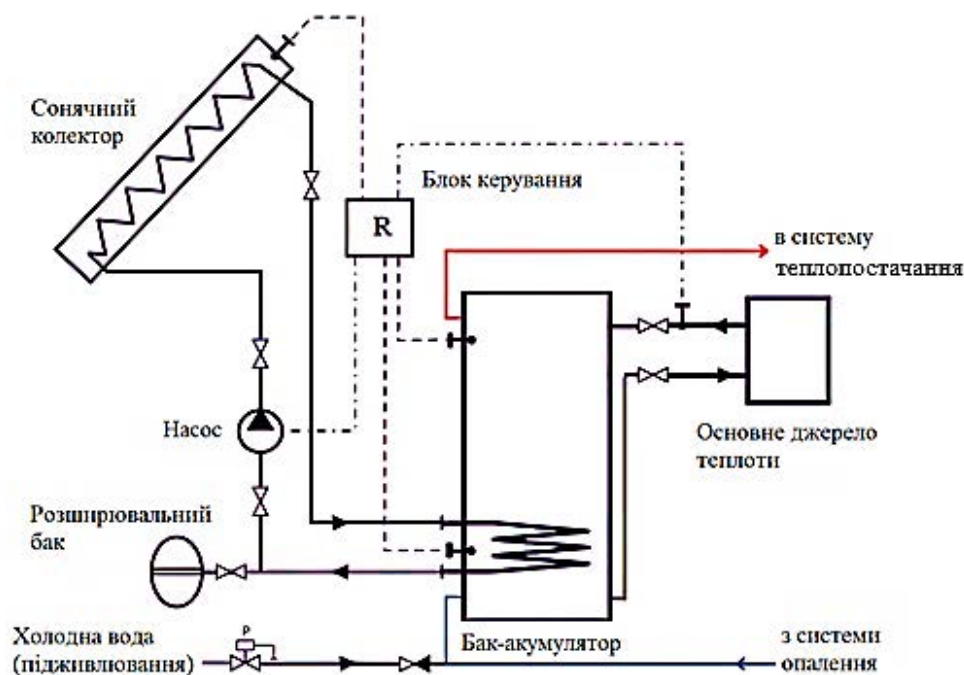


Рис. 3. Схема системи теплопостачання з використанням сонячних колекторів і бака-акумулятора

Післяпідстановкивихіднихданихуформулу(5), отримасемо:

$$W_{\text{ЕЛ}} = \frac{1600 \cdot 0,98 \cdot 4,187 \cdot (55-5)}{3600} = 91,18 \text{ (кВт}\times\text{год)}.$$

Економія коштів на оплату енергоносіїв, грн.:

$$\Gamma = W_{\text{ЕЛ}} \cdot C_{\text{ЕЛ}} \cdot n_{\text{РОБ}}, \quad (6)$$

де $C_{\text{ЕЛ}}$ – діючий тариф на електроенергію, $C_{\text{ЕЛ}} = 2,64$ грн./кВт × год;
 $n_{\text{РОБ}}$ – кількість днів опалювального періоду.

Таким чином, згідно формули (6), зекономлено коштів:

$$\Gamma = 91,18 \cdot 2,64 \cdot 151 = 36348 \text{ (грн.)}$$

Вартість основних комплектуючих геліосистеми на базі сонячних вакуумних колекторів наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Вартість основних комплектуючих геліосистеми на базі сонячних колекторів

Найменування	Позначення	Ціна, грн	Кількість, шт	Сума, грн
Колектор	$\Gamma_{\text{СК}}$	17 290	15	259 350
Бак – акумулятор	$\Gamma_{\text{БА}}$	30 900	1	30 900
Додатковеобладнання для геліосистеми*	$\Gamma_{\text{ДО}}$	12 337	1	20 442
		8085	1	
Роботи з монтажу і встановлення **	$\Gamma_{\text{РОБ}}$	60 517	-	60 517
Вартість геліосистеми	$\Gamma_{\text{ГС}}$	-	-	371 209

*Додаткове обладнання геліосистеми складається з вартості насоса та контролера

** Вартість робіт з монтажу прийнято як 20% від вартості основного обладнання

Приблизний простий термін окупності геліосистеми, рік:

$$\tau_{\text{ОК}} = \frac{\Gamma_{\text{ГС}}}{\Gamma} \quad (7)$$

У нашому випадку:

$$\tau_{\text{ОК}} = \frac{371\,209}{36\,348} = 10,2 \text{ (рік)}$$

Отже, при використанні геліосистеми з 15-ти сонячних вакуумних колекторів для потреб часткового опалення будинку термін окупності сонячної установки складає 10,2 років.

Потужність геліосистеми з 53-ох фотоелектричних модулів, кВт:

$$P_{\text{ГС}} = P_{\text{СБ}} \cdot n_{\text{СБ}} \quad (8)$$

де $P_{\text{СБ}}$ – потужність однієї сонячної батареї LongiSolar LR5-54НН-410М;

$P_{\text{СБ}} = 0,41$ кВт, згідно технічних характеристик [8];

$n_{\text{СБ}}$ – кількість сонячних фотоелектричних модулів за розрахунком.

$$P_{\text{ГС}} = 0,41 \cdot 0,53 = 21,72 \text{ (кВт)}.$$

Вартість основних комплектуючих геліосистеми на базі сонячних панелей наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Вартість основних комплектуючих геліосистеми на базі сонячних панелей

Найменування	Позначення	Ціна, грн.	Кількість, шт.	Сума, грн.
Колектор	$\Gamma_{\text{СК}}$	6 176	53	327 328
Бак – акумулятор	$\Gamma_{\text{БА}}$	30 900	1	30 900
Додаткове обладнання для геліосистеми*	$\Gamma_{\text{ДО}}$	56 022	1	71 856
		15 834	1	
Роботи з монтажу і встановлення **	$\Gamma_{\text{РОБ}}$	86 017	-	86 017
Вартість геліосистеми	$\Gamma_{\text{ГС}}$	-	-	516 101

*Додаткове обладнання геліосистеми: сонячний мережевий інвертор SOLIS-20K із номінальною вихідною потужністю 20 кВт [14] та двосторонній електричний лічильник для «зеленого тарифу» GAMA 300 G3B.144.230. F27 5 (100) А трифазного [15]

** Вартість монтажних робіт прийнято як 20% від вартості основного обладнання

Таблиця 4

Середньомісячна потреба в тепловій енергії на опалення ($Q_{\text{міс}}$) залежно від середньомісячної суми сонячної радіації ($E_{\text{міс}}$), виробленої системою з 53-ох сонячних модулів із загальною площею 103,35 м²

Назва місяця	$Q_{\text{міс}}$, кВт×год	$E_{\text{міс}}$, кВт×год
Січень	5201	911
Лютий	4504	1281
Березень	4086	2018
Квітень	-	2399
Травень	-	3167
Червень	-	3164
Липень	-	3207
Серпень	-	2991
Вересень	-	2417
Жовтень	-	1658
Листопад	3783	790
Грудень	4771	624

Для визначення річного прибутку від продажу електроенергії згідно «зеленого тарифу» використано формулу, грн.:

$$\Gamma_{\text{ЗТ}} = C_{\text{ЕЛ.ЗТ}} \cdot E_{\text{СУМ}} \quad (9)$$

де $C_{\text{ЕЛ.ЗТ}}$ – тариф на електроенергію, вироблену з енергії сонячного випромінювання генеруючими установками приватних господарств, встановлена потужність яких не перевищують 30 кВт, $C_{\text{ЕЛ.ЗТ}} = 6,28$ грн/кВт×год;

$E_{\text{СУМ}}$ – сума надлишку енергії, виробленої геліосистемою на базі фотоелектричних модулів з квітня

по жовтень включно, $E_{\text{СУМ}}=19003$ кВт×год, згідно результатів розрахунку, які наведені в таблиці 4.

$$\Gamma_{\text{ЗТ}}=6,28 \cdot 19 \ 0003=119 \ 339 \text{ грн.}$$

Приблизний простий термін окупності геліосистеми пораховано згідно формули, рік:

$$\tau_{\text{ОК}}=\frac{\Gamma_{\text{ГС}}}{\Gamma+\Gamma_{\text{ЗТ}}}, \quad (10)$$

У нашому випадку:

$$\tau_{\text{ОК}}=\frac{516 \ 101}{36 \ 348+119 \ 339}=3,3 \text{ (рік)}$$

Отже, при використанні геліосистеми з 53-ох сонячних фотоелектричних модулів для

потреб часткового опалення будинку, термін окупності сонячної установки складає 3,3 року.

Висновки. Таким чином, результати розрахунку показують, що незважаючи на менші початкові інвестиції у встановлення вакуумних сонячних колекторів, їх термін окупності на 6,9 років більший порівняно з геліоустановкою на базі фотоелектричних модулів. Також важливо, що після закінчення терміну окупності системи з фотоелектричними модулями, річний прибуток від продажу надлишку електричної енергії за «зеленим тарифом» для умов м. Києва з квітня по листопад складатиме 119 339 грн.

Список літератури:

1. Малєєв В.О. Перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні / В.О. Малєєв, В.М. Безпальченко, Д.С. Макачук // Актуальні проблеми сучасної енергетики: матеріали II-ої Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції студентів, аспірантів і молодих вчених. Херсон : ХНТУ, 2017. С.74–70.
2. Мхітарян Н. М. Енергозбеігаючі технології в житловому та цивільному будівництві / Н. М. Мхітарян. К. : Наукова думка, 2000. 416 с.
3. Сонячна енергетика: теорія та практика: монографія [Текст] / Й.С. Мисак, О.Т. Возняк, О.С. Дацько, С.П. Шаповал. Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2014. 340 с.
4. ДСТУ-Н.Б.В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. Київ, 2011. 119 с.
5. Оцінка сучасного енергетичного потенціалу джерел чистої енергії Сумської області. URL: https://merp.org.ua/images/Docs/USAID_MERP_Sumy_Oblast_ASEpotential.pdf (дата звернення: 20.11.2023).
6. EN 12831:2003 (E) Heating systems in buildings – Method for calculation of the design heat load. – CEN, 2003. – 76 с.
7. Вакуумний колектор СВК-20. URL: <https://prel.prom.ua/p464893247-vakuumnij-kolektor-svk.html> (дата звернення: 20.11.2023).
8. Сонячна батарея Longi Solar LR5-54НН-410М, 410Вт. URL: <https://solar-tech.com.ua/ua/solar-electricity/solar-panels/solnechnaya-batareya-longi-solar-lr5-54nih-410m-chorna-rama.html> (дата звернення: 20.11.2023).
9. ДСТУ-Н Б В.2.5-43:2010. Інженерне обладнання будинків і споруд. Настанова з улаштування систем сонячного теплопостачання в будинках житлового і громадського призначення. К., 2010. 45 с.
10. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Київ, 2022. –3 с.
11. Теплоаккумулятор ЕкоЕнергія АБ- 1600 ІН 25кВт з нижнім теплообмінником. URL: <https://ekoenergy.com.ua/ua/p1091462182-teploakkumulyator-ekoenergiya-1600.html> (дата звернення: 20.11.2023).
12. Циркуляційний насос Wilo TOP-S 25/7 DM. URL: <https://teploradost.com.ua/ua/cirkulyacionnyj-nasos-wilo-tops-257-dm-2048321> (дата звернення: 20.11.2023).
13. Контролер для сонячних колекторів. URL: <https://solarbud.com.ua/ua/p412812099-sr618s6-sk618s6-kontroler.html> (дата звернення: 20.11.2023).
14. SOLIS-20K Сонячний мережевий інвертор. URL: <https://eco-tech.com.ua/ua/p799239666-solis-20k-solnechnyj.html> (дата звернення: 20.11.2023).
15. Двосторонній елетросчечик для «зеленого» тарифа GAMA 300 G3B.144.230.F27 5 (100) А трифазний. URL: <https://eco-tech.com.ua/ua/p501786832-dvustoronnij-eletroschetchik-dlya.html> (дата звернення: 20.11.2023).

Kutny B.A., Chernetska I.V., Shneider S.V. COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF USING PHOTOVOLTAIC PANELS AND SOLAR COLLECTORS FOR HEAT SUPPLY OF AN INDIVIDUAL HOUSE

The use of solar heating systems is one of the most promising ways to generate energy for heating individual houses. The main reasons that hinder the introduction of solar thermal systems in Ukraine are the high level of initial capital costs, daily and seasonal irregularity of solar energy production, as well as strict dependence on climatic conditions. At the same time, there is a growing need to introduce alternative reliable energy sources capable of ensuring the autonomous operation of heating and hot water supply systems in individual houses without using traditional high-cost scarce energy carriers. Power outages prompt the search for new reliable sources of energy.

The main types of solar systems that provide heat to buildings are photovoltaic panels and solar collectors. Accordingly, a question arises as to the expediency and economic efficiency of installing one or another system. This paper is devoted to a comparative analysis of photovoltaic solar panels and vacuum collectors for the heat supply needs of an individual residential building in Ukraine. The calculation of thermal energy for the heating needs of an individual house in the conditions of the Kyiv city has been carried out, the necessary technological equipment of solar systems has been selected to cover the calculated load, and the cost savings on the payment of energy carriers during the heating season when using solar heat supply systems have been calculated. The cost of solar systems made with the use of vacuum collectors and photovoltaic modules has been determined, their payback periods being analyzed.

Key words: solar energy, solar system, photovoltaic panels, solar collector, house heating, solar heat supply, payback period, heat power industry.

Пантелєєва І.В.

Українська інженерно-педагогічна академія

Шматько Н.М.

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ СХЕМ ВИДАЧІ ПОТУЖНОСТІ ОБ'ЄКТІВ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ТА РОЗМІЩЕННЯ ДЖЕРЕЛ ГЕНЕРАЦІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

У статті визначені особливості технологічного приєднання об'єктів РГ до електричних мереж та проектування схем видачі потужності, а також вибір місця підключення об'єкта РГ. Визначено, що будівництво об'єктів РГ промисловими підприємствами є вимушеною мірою по зниженню собівартості та підвищенню конкурентоспроможності продукції, а також забезпеченню надійного електропостачання електроприймачів. Тарифи на електроенергію та надійність електропостачання не дозволяє енергоємним та технологічно складним промисловим виробництвам розвиватися та стійко функціонувати, а також що максимальна потужність об'єкту РГ повинна обиратись, виходячи з тих задач, які планується вирішити за рахунок будівництва даного об'єкту. В автономному режимі роботи максимальна потужність РГ визначається максимальним навантаженням району, який розглядається, значенням втрат потужності та власних потреб самого об'єкту, а також необхідного резерву для забезпечення надійності при аварійних та планових ремонтних відключеннях ГУ. Кількість агрегатів, працюючих одночасно, та їх навантаження повинні бути такими, щоб при відключенні найбільш потужного інші могли повністю покрити існуюче навантаження. За допомогою вводу до експлуатації двох електростанцій потужністю 20 МВт кожна з приєднанням зі сторони 10 кВ до існуючих ПС 110/35/10 кВ, а також вводу в експлуатацію третьої електростанції, будівництвом нової ПС 110/10 кВ з приєднанням до мережі 110 кВ вдалося вирішити дві проблеми: енергодефіцитності району та перенавантаження існуючого обладнання. Визначено, що необхідно розробити вимоги до розробки схеми видачі потужності об'єктів РГ та вимоги до генеруючого обладнання об'єктів РГ. Зростання частки РГ в ЕС має не тільки позитивні сторони, а й проблеми, пов'язані з труднощами забезпечення стійкості, регулювання та підтримки оптимальних, запобігання та ліквідації аварійних, та забезпечення після аварійних режимів. Розподільча мережа стає активною, суттєво ускладнюються диспетчерське та автоматичне управління.

Ключові слова: розподілена генерація, електроенергія, електропостачання, генеруючі установки, енергетичні системи, об'єкт розподіленої генерації, розподілені мережі.

Постановка проблеми. Протягом багатьох десятиріч енергетика розвивалась шляхом підвищення концентрації та збільшення одиничних потужностей. З метою збільшення ККД підвищувались потужності енергетичних установок, збільшувались рівні номінальної напруги електричних мереж. Для забезпечення роботи об'єднаних електроенергетичних систем (ОЕС) створювались багаторівневі системи диспетчерського управління. Централізований шлях розвитку енергетики привів до виникнення енергетичних корпорацій, що монополюють забезпечують енергією споживачів, а також ремонт, технічне обслуговування та інші допоміжні послуги.

Модернізація електроенергетики привела до фінансової самостійності електромережних ком-

паній, джерелами якої є грошові кошти за транспортування електроенергії (ЕЕ) та платня за технічне приєднання. При збільшенні кількості електромережних підприємств та зменшення розміру кожної по зрівнянню з дореформеними енергокомпаніями суттєво зросли ризики управлінських рішень. Фінансова відповідальність електромережних компаній за власні мережі привела до підвищення значимості питань енергобезреження, зниженню нормальних втрат ЕЕ та підвищення якості вимірювальних систем обліку ЕЕ. Зростання навантаження електроспоживання, тривалий термін служби діючого силового обладнання та пов'язаний з ним знос потребують адекватного управління електромережевими об'єктами.

В останні роки спостерігається зростання використання споживачами ЕЕ генеруючих агрегатів малої потужності в ОЕС на середніх та низьких рівнях напруги, у тому числі і на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), у вигляді сукупності розподілених енергетичних ресурсів. Така тенденція пов'язана з більшою інвестиційною привабливістю генеруючих об'єктів малої потужності, які потребують менший термін окупності та, як наслідок менший інвестиційний ризик.

Практика використання розподіленої генерації (РГ), тобто генерації поблизу джерел споживання або безпосередньо на їх території, в Україні явище не нове. Щорічно спостерігається зростання об'єктів РГ на базі газопоршневих, газотурбінних та дизельних генеруючих установок (ГУ). Однак на сьогодні існують деякі проблеми як в процесі технологічного приєднання (ТП) об'єктів РГ до електричних мереж, так і при експлуатації введених у роботу станцій, які обумовлені недосконалістю законодавчої бази у частині ТП об'єктів РГ до електричних мереж та недоліками у нормативно-технічних базі, необхідній при розробці схеми видачі потужності електростанцій [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останній час все більша кількість наукових публікацій вчених пов'язано з питаннями РГ, оскільки у багатьох економічно розвинутих країнах Європи та в США частка електроенергії, що виробляється у системах РГ, знаходиться на рівні 15–30 % [2].

При будівництві об'єкта РГ потребується його ТП до електричних мереж мережевих організацій та укладання договору на послуги по оперативно-диспетчерському управлінню. На практиці порядок технологічного приєднання об'єктів РГ до електричних мереж наступний [3]:

- укладання договору на ТП та видача технічних умов (ТУ) на технологічне приєднання;
- розробка схем видачі потужності;
- коректування технічних умов;
- розробка проектної та робочої документації;
- монтаж та введення в експлуатацію об'єкта.

В ТУ на ТП містяться вимоги до характеристики об'єкта РГ або встановленого на ньому обладнання. Часто вони виявляються або завищеними, або, навпаки, не враховують особливості роботи ГУ малої потужності, що згодом може привести до некоректної роботи ГУ у складі енергосистеми або виникненню аварій [4]. ТП об'єктів РГ до мережі по існуючій моделі на практиці займає тривалий час і може привести до суттєвого збільшення капітальних витрат на спорудження

об'єктів РГ, що безсумнівно веде до втрати інтересу до будівництва об'єктів РГ у потенційних інвесторів.

Процес розвитку РГ промисловими підприємствами в Україні носить малокерований та погано прогнозуємий характер. Це приводить до негативних наслідків, які не дозволяють отримувати позитивні локальні та системні техніко-економічні ефекти для суб'єктів електроенергетики, а також для споживачів [5, 6].

Будівництво об'єктів РГ промисловими підприємствами є вимушеною мірою по зниженню собівартості та підвищенню конкурентоспроможності продукції, а також забезпеченню надійного електропостачання електроприймачів. Тарифи на електроенергію та надійність електропостачання не дозволяє енергоємним та технологічно складним промисловим виробництвам розвиватися та стійко функціонувати.

На протязі багатьох років існує проблема закритих центрів живлення як в магістральних, так і в розподільчих електричних мережах. Закритий центр живлення – це підстанція, до якої неможливо здійснити технологічне приєднання нових споживачів із дотриманням параметрів надійності та якості виконання раніш прийнятих зобов'язань [7].

Виходячи з вищесказаного, необхідно розробити порядок технологічного приєднання генеруючих потужностей до електричних мереж, який відрізняється від існуючого порядку технологічного приєднання споживачів, який враховує інтереси як мережевих організацій, так і заявників. Тобто, уникнути тривалого етапу коректировки технічних умов, прискорити введення об'єкта в експлуатацію допоможе розробка схеми видачі потужності електростанції на першому етапі, тобто до укладання договору та видачі ТУ на ТП. Це також дозволить інвестору оцінити обсяг капітальних витрат на будівництво об'єкта, мережеві організації – оцінити можливість надійного електропостачання споживачів, а системному оператору – оцінити вплив об'єкта РГ на функціонування електричних мереж.

Мета статті – визначити особливості технологічного приєднання об'єктів РГ до електричних мереж та проектування схем видачі потужності, а також вибір місця підключення об'єкта РГ.

Виклад основного матеріалу. Для надійного функціонування об'єктів РГ та електричних мереж необхідна проробка цілого ряду технічних та схемних рішень, які враховують особливості роботи ГУ малої потужності та функціонування

розподільчих мереж. Ці рішення доцільно про-робляти у рамках позастандартної роботи – схема видачі потужності електростанції. Розробка СВП об'єктів РГ має особливості практично на всіх етапах роботи.

Важливе питання, на яке необхідно відповісти перед початком проектування об'єкта – які задачі треба вирішити за допомогою даного об'єкту РГ. Об'єкти розподіленої генерації можуть, зокрема, використовуватись [8]:

- для резервування електропостачання відпо-відальних споживачів;
- для вирішення проблем у розподільчих мережах: недостатня потужність трансформато-рів, недостатня пропускна здатність ЛЕП;
- для покриття пікових навантажень у режимі паралельної роботи з ЄЕС;
- у якості автономних джерел електроенергії, тепла (режим когенерації) і холоду (режим триге-нерації);
- для зниження витрат на купівлю електро-енергії за рахунок утилізації вторинних енергоре-сурсів;
- для покриття втрат електроенергії у розпо-дільчих мережах.

Те, яка задача буде вирішуватись за допомогою об'єкта РГ, безумовно, впливає на схему підклю-чення об'єкта РГ до електричних мереж, на його режим роботи, на технологію виробництва елек-тричної енергії, на кількість та потужність агре-гатів у складі об'єкта, на вимоги до релейного захисту та протиаварійної автоматики.

Якщо об'єкт РГ працює в автономному режимі, тобто на виділеній збалансований район, слід відповідально підходити до вибору кількості та потужності генеруючих установок. Одиначна потужність установок визначається, виходячи з мінімуму навантаження району та технологі-чного мінімуму установки.

Ще один важливий момент при роботі РГ в автономному режимі – врахування допустимої швидкості скидання та набір навантаження. Різкі зміни активної потужності навантаження можуть привести до відключення генераторів технологі-чними захистами.

У відповідності з діючими нормативами є ряд обов'язкових вимог до об'єктів РГ, працюючих паралельно з ЄС [9]:

- все генеруюче обладнання повинно при-ймати участь у загальному регулюванні частоти;
- повинна бути забезпечена робота ГУ у таких діапазонах частот: 46,0–47,0 Гц протягом не менше 1 с; 47,0–47,5 Гц протягом 30–40 с.

– системи збудження повинні відповідати вимогам ПТЕ;

– потребується диспетчеризація системного оператора електростанцій потужністю більше 25 МВт, спостережувальність – від 5 МВт.

Крім того, при такому режимі роботи можуть виникати проблеми зростання струмів короткого замикання, складнощі з організацією релейного захисту елементів прилеглої мережі, складнощі з динамічною стійкістю генераторів.

Максимальна потужність об'єкту РГ повинна обиратись, входячи з тих задач, які планується вирішити за рахунок будівництва даного об'єкту. В автономному режимі роботи максимальна потужність РГ визначається максимальним наван-таженням району, який розглядається, значен-ням втрат потужності та власних потреб самого об'єкту, а також необхідного резерву для забез-печення надійності при аварійних та планових ремонтних відключеннях ГУ. Кількість агрегатів, працюючих одночасно, та їх завантаження пови-нні бути такими, щоб при відключенні найбільш потужного інші могли повністю покрити існуюче навантаження.

Таким чином, щоб вірно вибрати потужність об'єкту, кількості та потужності агрегатів повинні бути відомі наступні дані:

- відомості про електричні навантаження району, що розглядається (навантаження спожи-вачів, характерні добові та річні графіки наван-таження, категорія надійності електропостачання споживачів, максимальна одиначна потужність споживачів що одночасно вмикаються);
- максимальна потужність агрегатів, які роз-глядаються до установки, та відомість про техно-логічний мінімум навантаження генераторів.

У дослідженнях СІГРЕ (Міжнародна рада по великим електричним системам високої напруги) звертається увага на основі тенденції, які можна спостерігати у всьому світі [10]:

- зростання сумарної встановленої потуж-ності об'єктів РГ в енергосистемах;
- зростання встановленої потужності оди-начних об'єктів, включаючи появу вітропарків та крупних сонячних електростанцій;
- зростання електроспоживання у містах (більше 80 % населення світу).

Тому вибір місця підключення об'єкту РГ до електричних мереж має дуже важливе значення, і повинне обиратися, виходячи із задачі, яку необ-хідно рішати, а також, виходячи із первинних умов (існуюча схема електричної мережі, перспектива розвитку мереж).

На рис. 1 приведені основні варіанти розміщення об'єктів РГ в електричній мережі.

Об'єкт РГ може бути підключений до шин підстанцій різного класу напруги: до шин підстанцій (ПС) 110–220 кВ або до шин розподільчих пристроїв (РП) напруги 0,4–10 кВ. Вибір напруги, на яку передбачається підключити об'єкт РГ, повинна визначитися, перш за все, потужністю об'єкта РГ, віддаленістю його від споживачів чи електричних мереж, тими задачами, які передбачається вирішувати за допомогою установки даного об'єкту. У всіх варіантах розміщення об'єкта РГ (рис. 1) потрібно виконати ряду заходів для забезпечення надійного функціонування об'єкта електропостачання споживачів.

Наприклад, при установці об'єкту РГ у мережах 0,4–10 кВ потрібна реорганізація системи релейного захисту, оскільки порушується принцип радіальності розподільчих мереж, так як підживлення точки КЗ стає двостороннім. Також у цих випадках можливо знадобиться замінити комутаційне та інше електротехнічне обладнання, що обумовлене зростанням струмів КЗ у розподільчих мережах.

При розгляданні варіантів розміщення об'єктів РГ необхідно виконати попередній аналіз існуючого стану електричних мереж, виявити «вузькі» місця. Наприклад, при розробці СВП електричних станцій малої потужності в одному з енергодефіцитних районів було встановлено, що у післяаварійних режимах, що виникають у нормальній

схемі мережі, мають струмові перевантаження ПЛ 110 кВ ТЕЦ-ПС 401 при відключенні 2-ї системи шин (СШ) ПС 401, які складають 125 % від допустимого навантаження. Перевантаження цієї лінії також виявлені у післяаварійних режимах у ремонтних схемах мережі.

За допомогою вводу до експлуатації двох електростанцій потужністю 20 МВт кожна з приєднанням зі сторони 10 кВ до існуючих ПС 110/35/10 кВ, а також вводу в експлуатацію третьої електростанції, будівництвом нової ПС 110/10 кВ з приєднанням до мережі 110 кВ вдалося вирішити дві проблеми: енергодефіцитності району та перенавантаження існуючого обладнання.

При цьому в ході аналізу результатів розрахунків післяаварійних режимів, виникаючих як в нормальній, так і в ремонтній схемі мереж, встановлено, що струмових перевантажень ліній 110–220 кВ, автотрансформаторів 220/110 кВ та трансформаторів 110 кВ не спостерігається [11–13].

При розробці СВП об'єктів РГ слід враховувати той факт, що прийняте невірне рішення може привести до аварій в електричних мережах. Зокрема, аварійні відключення ГУ або частини навантаження можуть приводити до перетоків потужності з розподільчої мережі у мережі більш високого класу напруги. Це, в свою чергу, може привести до перенавантаження обладнання живлячого центру або розподільчої мережі, до якої приєднаний об'єкт РГ. Щоб уникнути даної про-

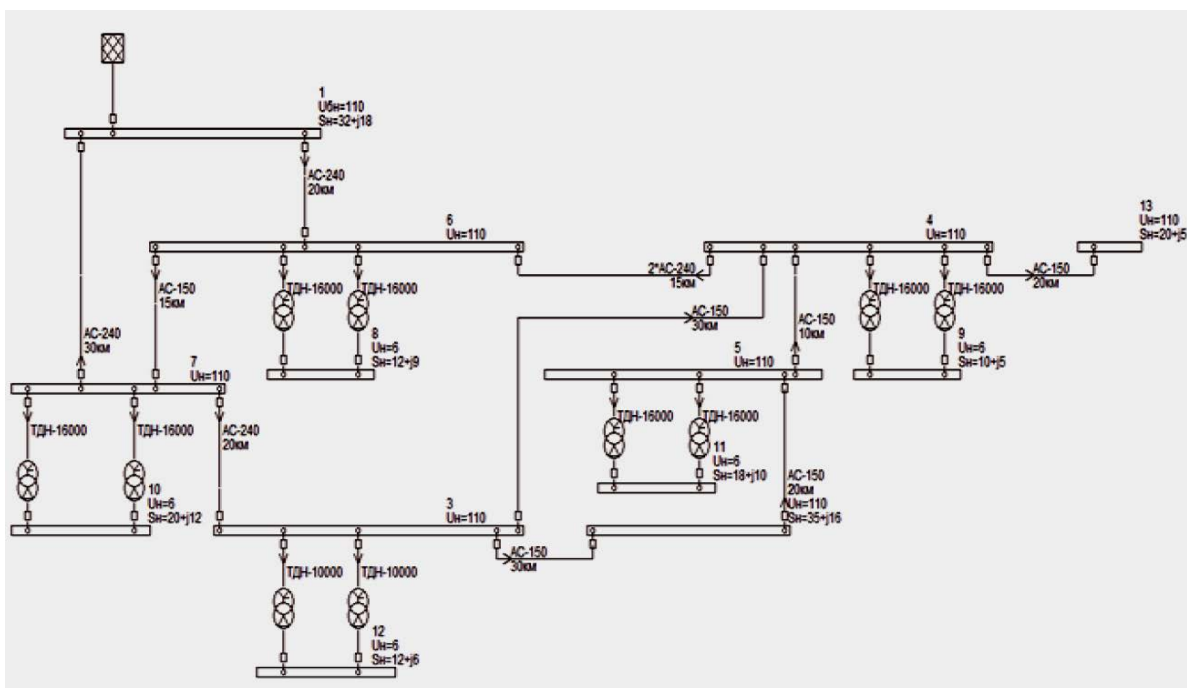


Рис. 1. Основні варіанти розміщення об'єктів РГ в електричній мережі

блеми, може бути потрібна зміна топології мережі та (або) заміна силового обладнання, та вибір альтернативного місця підключення об'єкта РГ.

Підключення об'єкта РГ, як і будь-якого іншого генеруючого обладнання, приводить до зростання струмів КЗ в електричних мережах. При паралельній роботі об'єктів РГ з енергосистемою виникають реверсивні потоки потужності, що приводить до необхідності перегляду конфігурації мережі, реорганізації релейного захисту, а у ряді випадків – до необхідності установки додаткових пристроїв релейного захисту.

При проведенні розрахунків важливо оцінити вплив нормативних збурень на стійкість ГУ, які мають невеликі механічні постійні інерції. Так, для одновальних ГТУ механічна постійна інерції складає 5–15 с., для багатовальних ГТУ без редуктора – 1,5–3 с. Ймовірність втрати синхронної роботи генераторів малої потужності при збуреннях як в енергосистемі, так і в розподільчій мережі достатньо велика. При цьому необхідні особливі підходи до ліквідації можливих асинхронних режимів (АР), оскільки ймовірність ресинхронізації ГУ малої потужності достатньо велика [14].

Дійсні нормативні документи [3, 4] наказують, що десинхронізація як із застосуванням автоматичних пристроїв, так і мимовільна повинна резервуватися розділенням, при цьому допустима тривалість асинхронного режиму та засіб його припинення встановлюються окремо. Треба враховувати необхідність запобігання пошкодження обладнання системи, додаткових порушень синхронізму та порушень електропостачання споживачів. Таким чином, необхідна установка пристроїв автоматичної ліквідації асинхронного режиму (АЛАР) з витримкою часу (по кількості циклів АР).

Важливий момент при розробці СВП – оцінка механічної стійкості ГУ при зовнішніх КЗ. При підключенні ГТУ малої потужності у вузли електричної мережі, які характеризуються жорстким зв'язком з енергетичною системою, не завжди вдається узгодити параметри налаштування існуючих у мережі пристроїв РЗА та одночасно забезпечити динамічну цілісність та електродинамічну стійкість генераторів, механічну міцність муфт ГТУ. При визначенні гранично допустимої тривалості КЗ необхідно керуватись не тільки динамічною цілісністю, а й електродинамічною стійкістю, в цілому.

Часто задаються установки спрацювання пристроїв релейного захисту, які діють на відключення генератора за час, що не перевищує 0,2 с, у наступних випадках:

– зниження частоти нижче 47,5 Гц, або підвищення частоти більше 50,2 Гц;

– зниження напруги до 0,9 від номінальної.

Таким чином, відключення об'єкта РГ такими захистами відбувається до спрацювання пристроїв релейного захисту електромережових елементів у прилеглий мережі та протиаварійної автоматики, що посилює розвиток аварії в енергосистемі.

При введенні до експлуатації відносно потужної системи РГ поблизу крупних ТЕЦ, необхідно врахувати можливість відходу споживачів від централізованого енергопостачання. Це збільшує ризики зменшення валового виторгу енергокомпанії. Крім того, стихійне зростання кількості та потужності установок РГ небезпечний для централізованої енергосистеми у випадку, якщо частка некерованої малої генерації зростає до 20–30 %. Це може бути критичним для стійкості всієї системи. При відносно невеликій потужності окремих джерел РГ навіть нормальні режими пуску, набросу навантаження на великі електродвигуни або їх різкий останов можуть привести до порушення стійкості ГУ системи РГ та вплинути на режим основної мережі.

Те ж саме можна відмітити і відносно наслідків різного роду пошкоджень обладнання мережі (КЗ, обриви повітряних і кабельних ліній, перенавантаження). Підключення джерел РГ до розподільчої мережі зменшує її опір, збільшуючи струми КЗ.

Так як ГУ систем РГ підключені до відносно «слабких» розподільчих мереж напругою 35–110 кВ, межа потужності в них обмежується не тільки умовами стійкості, а й можливістю роботи у режимі перевантажень. Тому у розподільчих мережах відносно великої протяжності можливе виникнення аварійних режимів, пов'язаних з порушенням стійкості по напрузі.

При відносно великій кількості ГУ в системі РГ можливе угруповання їх в «острови» (Islanding) – збалансовані по генерації та споживанню підсистем з використанням мінімальних перерізів мережі для їх виділення. Втрата живлення від підстанції основної мережі дозволяє через Islanding виділити установку РГ на «близьке» по потужності навантаження, що забезпечить електропостачання відповідальних споживачів.

Слід врахувати, що ГУ, які входять у склад виділеного «острова», можуть відрізнятись не тільки по способам генерації, а й по потужності, маневреності, типу турбін і генераторів. Це накладає додаткові труднощі у забезпечення нормального (або близького до нього) режиму електропостачання споживачів, підключених до ГУ «острова».

Висновки. 1. При розробці СВП необхідно розробити порядок технологічного приєднання генеруючих потужностей до електричних мереж,

який відрізняється від існуючого порядку технологічного приєднання.

2. Необхідно розробити типові вимоги до ТУ на ТП для підключення об'єктів РГ з обліком потужності об'єкту, режиму роботи енергетичної установки.

3. Необхідно розробити вимоги до розробки схеми видачі потужності об'єктів РГ та вимоги до генеруючого обладнання об'єктів РГ.

4. Зростання частки РГ в ЕС має не тільки позитивні сторони, а й проблеми, пов'язані з труднощами забезпечення стійкості, регулювання та підтримки оптимальних, запобігання та ліквідації аварійних, та забезпечення після аварійних режимів. Розподільча мережа стає активною, суттєво ускладнюються диспетчерське та автоматичне управління.

Список літератури:

1. Стогній Б.С., Кириленко О.В. Інформатизація та інтелектуалізація електроенергетики: пріоритети та практичні доробки. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України*, 2015. № 3(3). С. 4–18.
2. Стогній Б.С., Денисюк С.П. Інформатизація електроенергетичних систем та електричних об'єктів. *Зб. наук праць НАН України*, №1(16), Ч. 1, 2017. С. 9–15.
3. Assessment of the set of regulations and methodologies for tariff setting in Ukraine/ Energy Community. 2018. <https://www.energy-community.org/news>
4. Annual energy outlook 2018 with projections to 2050/EIA. 2018. URL: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo>
5. Cohen J. et al. An empirical analysis of local opposition to new transmission lines across the EU-27. *Energy Journal*. 2016. № 37 (3). P. 59–82.
6. EcoGrid EU – a prototype for European smart grids. Deliverable D6.7. Overall evaluation and conclusion. 2016. URL: <https://www.eu-ecogrid.net/images/Documents/D6.7>.
7. Колосок І, Вакуленко І. Досвід розбудови розумних енергетичних мереж на міжнародному рівні: *Монографія: Сумський державний університет*, 2019. 109 с.
8. Пантелєєва І.В., Добровольська Є.Ю. Допустимість спрощення динамічних моделей навантаження у розрахунках електромеханічних перехідних процесів в енергорайонах з розподіленою генерацією. *Друга Міжнародна НТК Science of XXI Century Development. Main Theories and Achievements*, 2022, Гельсінкі, FIN. С. 10–13.
9. Кириленко О., Павловський В. Технічні аспекти впровадження джерел розподіленої генерації в електричних мережах. *Електроенергетичні системи та установки. Технічна електродинаміка*. 2017. № 1. С. 46–53.
10. Dominich S. *Mathematical Foundations of Information Retrieval*. 2020. 304 p.
11. Енергоефективні технології та відновлювальні джерела енергії [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://сва.org.ua/images/stories/document/EE Manual UKR.>
12. Пантелєєва І.В., Шматко Н.М. Сучасний стан економічного розвитку мікроГЕС у світі. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2016. № 47 (1219). С. 101–104.
13. Popov O., Shmatko N., Budanov P., Pantelieieva I., Brovko K. Cost-effectiveness in mathematical modelling of the power unit control. *Eastern-Europan Journal of Enterprise Technologies*. 6/3(102). 2019. P. 20–28.
14. Budanov, P, Brovko, K, Cherniuk, A, Pantelieieva, I, Oliynyk, Yu, Shmatko, N & Vasyuchenko, , Improvement of safety of autonomous electrical installations by implementing a method for calculating the electrolytic grounding electrodes parameters», *Eastern-Europan Journal of Enterprise Technologies*. 5/5 (95), 2018. Pp. 20–28.

Pantelieieva I.V., Shmatko N.M. FEATURES OF THE DESIGN OF POWER SUPPLY SCHEMES OF DISTRIBUTED GENERATION FACILITIES AND PLACEMENT OF GENERATION SOURCES IN ELECTRICAL NETWORKS

The article defines the peculiarities of the technological connection of WG objects to electric networks and the design of power output schemes, as well as the choice of the place of connection of the WG object. It was determined that the construction of WG facilities by industrial enterprises is a forced measure to reduce the cost price and increase the competitiveness of products, as well as to ensure a reliable power supply of electrical receivers. Electricity tariffs and the reliability of electricity supply do not allow energy-intensive and technologically complex industrial productions to develop and function sustainably, and also that the maximum capacity of the RG facility should be chosen based on the tasks that are planned to be solved by the construction of this facility. In the autonomous mode of operation, the maximum power of the RG is determined by the maximum load of the area under consideration, the value of power losses and own needs of the object itself, as well as the necessary reserve to ensure reliability in case of emergency and planned repair shutdowns of the GU. The number of units working at the same time and their loading should be such that when the most powerful one is turned off, the others can completely cover the existing load. With the commissioning of two power plants with a capacity of 20 MW each with a connection from the 10 kV side to the existing 110/35/10 kV substations, as well as the commissioning of a third power station, the construction of a new 110/10 kV substation with connection to the 110 kV network, it was possible to solve two problems: energy deficit in the district and overloading of existing equipment. It was determined that it is necessary to develop the requirements for the development of the power output scheme of WG facilities and the requirements for the generating equipment of WG facilities. The growth of the share of RG in the EC has not only positive aspects, but also problems related to the difficulties of ensuring stability, regulation and maintenance of optimal, prevention and elimination of emergency, and provision after emergency regimes. The distribution network becomes active, dispatching and automatic control become significantly more complicated.

Key words: distributed generation, electricity, power supply, generating plants, energy systems, distributed generation object, distributed networks.

Семичаєвський С.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Самченко Т.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

АНАЛІЗ ПРИЧИН МОЖЛИВИХ ПОЖЕЖ В МАШИННИХ ЗАЛАХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ

У цій публікації наведено актуальність питання забезпечення пожежної безпеки машинних залів енергетичних підприємств. Акцентовано увагу на тому, що наявність в системах охолодження турбогенераторів горючого і вибухонебезпечного водню у поєднанні з горючим маслом, температура самозаймання якого значно нижче, ніж у водню, власне і складає проблему забезпечення вибухотехнічної безпеки в машзалах електростанцій.

Проведено аналіз причин можливих пожеж в машинних залах АЕС і ТЕС. Досвід експлуатації енергоблоків, на яких встановлені турбогенератори з водневим охолодженням показав, що найбільш небезпечним порушенням з аварійними наслідками був виток водню із-за руйнування газомасляних ущільнень. Причиною таких аварій було лавиноподібне підвищення вібрації валопроводу зверх допустимих меж із-за обриву лопаток, яке призвело до руйнування ущільнень і інтенсивному виходу водню з корпусу турбогенератора. При цьому мало місце займання водню. При змішуванні палаючого водню з турбінним маслом, що витікає із зруйнованих із-за вібрації маслосистем, утворювався газомасляний факел з температурою більше 2000°C, висота якого досягала металевих ферм та інших металоконструкцій даху машзала.

Наведено відповідні таблиці з інформацією щодо розподілу катастрофічних ситуацій в машинних залах по першопричинам тощо. Зазначено, що особливу небезпеку у відношенні пожежі представляють собою системи регулювання турбін з високим тиском масла. Виток з такої системи супроводжується фонтануванням масла. Загоряння фонтануючого масла приводить до швидкого розповсюдження горіння на обладнання машинного залу і на його будівельні конструкції, що веде зазвичай до обвалення ферм перекриття покрівлі. Розущільнення корпусу турбогенератора і пов'язаної з ним газомасляної системи приводить до витoku водню в машинний зал, при цьому кількість водню, що виходить в одиницю часу, залежить від площі поперечного перетину щілини або отвору що утворилися і тиску водню в корпусі турбогенератора. Небезпечними наслідками витoku можуть бути загоряння або накопичення воднево-повітряної суміші з «хлопком» або вибухом в залежності від концентрації і об'єму суміші.

Ключові слова: водень, енергетичні підприємства, масло, машинні зали, пожежі, причини можливих пожеж, турбогенератори.

Постановка проблеми. Машинні зали енергетичних підприємств (зокрема АЕС і ТЕС) представляють собою одноповерхові будівлі і мають загальні компоновальні рішення і за висотою розділяються на два приміщення [1, 2]. В верхньому приміщенні встановлюють турбоагрегати (турбіни і генератори), в нижньому – конденсаційному розміщують конденсатори, живильні, конденсатні, дренажні і інші насоси, регенеративні і мережеві підігрівачі, інше допоміжне обладнання.

Під підлогою конденсаційного приміщення можливо улаштування підвалу глибиною 3–4 м, в якому розміщують насоси і трубопроводи охолоджуючої води, електричні кабелі і інші лінії комунікацій. Турбоагрегати в машинному залі компонується по «острівному» принципу.

На АЕС використовуються турбоагрегати однопотіпні з турбоагрегатами ТЕС і загальні принципи їх розміщення в об'ємі машзалів зберігаються.

Водень знаходиться зсередини циліндричного зварного корпусу турбогенератора (далі – ТГ), закритого торцевими щитами [1, 2].

Для запобігання витoku водню у місцях виходу валу, що обертається, з торцевих щитів корпусу з обох сторін ТГ встановлені масляні ущільнення. «Запирання» водню в ущільненнях здійснюється зустрічним потоком турбінного масла в зазорі між вкладишем та валом. Тиск масла перевищує тиск водню, зазвичай перепад тисків масла і водню складає від 0,04 до 0,09 МПа, що і запобігає виходу водню через зазор між вкладишем і валом. Для підведення масла в ущільнення і зливання його

передбачається система маслопостачання. Для заповнення ТГ воднем і підтримання заданого надлишкового тиску зсередини корпусу застосовується відповідне обладнання, що утворює газову систему ТГ. Комплекс – корпус ТГ, вузли ущільнень, обладнання газової системи і системи маслопостачання – складає газомасляну систему [1, 2].

Наявність в системах охолодження ТГ горючого і вибухонебезпечного водню у поєднанні з горючим маслом, температура самозаймання якого значно нижче, ніж у водню, власне і складає проблему забезпечення вибухотажної безпеки в машзалах електростанцій.

Треба відмітити, що існуючий комплекс заходів із забезпечення пожежної безпеки в машинних залах АЕС і ТЕС має низку недоліків [2]. Разом з тим, досвід експлуатації за останні десятиріччя показує, що на електростанціях, в тому числі і на атомних, трапляються великі аварії з катастрофічними наслідками – пожежами, значними пошкодженнями і (або) руйнуванням ТГ і будівельних конструкцій машинних залів внаслідок пошкодження ТГ і горіння водню і масла [2].

Враховуючи зазначене вище, набуває актуальності питання забезпечення пожежної безпеки машинних залів АЕС і ТЕС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Публікація [1] присвячена, зокрема, аналізу причин виникнення пожеж у машинних залах енергетичних підприємств, аналізу недоліків наявних систем пожежогасіння на цих об'єктах. Також наведено конкретні випадки неспрацювань систем пожежогасіння в машинних залах АЕС.

В публікації [2] досліджено сценарії можливих пожеж в машинних залах атомних і теплових електростанцій.

В той же час, слід зауважити, що потребує більш детального вивчення проблема виникнення можливих пожеж у машинних залах енергетичних підприємств.

Мета та завдання дослідження. З метою сприяння у вирішенні зазначеної проблеми у цій публікації необхідно ґрунтовно дослідити причини можливих пожеж в машинних залах АЕС і ТЕС. Результати дослідження сприятимуть розробленню відповідних заходів щодо запобігання виникнення пожеж в машинних залах електростанцій та пропозицій щодо вдосконалення існуючої системи їх протипожежного захисту.

Виклад основного матеріалу. аналіз причин можливих пожеж в машинних залах АЕС і ТЕС. Як відомо, загоряння стається при одночасній наявності горючих матеріалів, кисню пові-

тря, з яким взаємодіють горючі матеріали, і джерела запалювання, що має місце в машинному залі електростанції [1–3].

Горючі матеріали – турбінне масло, що застосовується в системах змазування, маслопостачання ущільнень валу, і водень, що застосовується в системі охолодження генератора.

Турбінне масло безпосередньо взаємодіє з киснем повітря в порожнинах в місцях зливання масла з підшипників і в головному маслобаці при атмосферному тиску, що безпечно при відсутності джерел запалювання.

Турбінне масло, що знаходиться в напірних маслопроводах при надлишковому тиску, може взаємодіяти з киснем повітря тільки при розгерметизації, яка має місце при пошкодженні підшипників, маслопроводів. Масло, що витікає або фонтанує, займається, потрапляючи на нагріті поверхні технологічного обладнання і, передусім, паропроводи турбіни, які є джерелами запалювання. Ці ж джерела запалювання приводять до займання теплоізоляції паропроводів і турбіни, яка просочена маслом.

Водень, який знаходиться в герметичній газомасляній системі генератора при надлишковому тиску, може активно взаємодіяти з киснем повітря тільки при розгерметизації цієї системи. Можливі джерела запалювання – щітково – контактний апарат генератора, де неминуче іскріння, колектори електродвигунів, струмоведучі частини, які знаходяться під високою напругою з неминучими струмами витоку і частковими розрядами в контурах цих струмів, а також іскра, що виникає при ударі металевих деталей. Крім того, можливе самозаймання струменя водню внаслідок тепловідділення і нагріву від тертя. Водень безпосередньо контактує з розпилим маслом в зливних камерах ущільнень вала, в зливних трубопроводах і в порожнині поплавкового гідрозатвора.

Коли стається виток водню з генератора, то, незважаючи на контакт водню з киснем повітря, не завжди стається займання водню або вибух воднево-повітряної суміші. Якщо ж займання струменю водню сталося, то енергії яка при цьому виділяється, достатньо для займання турбінного масла, яке витікає одночасно з системи змазування і ущільнення вала генератора.

Витоки водню можуть ставатися через місця стиків (фланцевих з'єднань деталей), що ущільнюються зазвичай резиновими шнурами, резиновими прокладками і манжетами.

Витоки водню можливі через дефекти зварних швів корпусу і торцевих щитів, через струмопідводи

і центральний отвір ротору, а також із різних місць обладнання і арматури газомасляної системи.

Водень потрапляє в картери підшипників через ущільнення при певних дефектах ущільнень, і регуляторів перепаду тисків масла і водню.

В машинних залах енергетичних підприємств існують основні принципи забезпечення вибухо- і пожежонебезпеки турбогенераторів з водневим охолодженням, наприклад:

- необхідна механічна міцність корпусу ТГ, торцевих щитів, корпусів ущільнень вала, демпферного бака, трубопроводів, арматури та іншого обладнання газомасляної системи;

- необхідна газощільність корпусу ТГ, торцевих щитів і корпусів ущільнень вала, гідрозатвора та іншого газонаповненого обладнання газомасляної системи;

- автоматичне підтримання заданого перепаду тисків масла і водню в стаціонарних, перехідних і аварійних режимах роботи ТГ і газомасляної системи;

- маслощільність корпусів ущільнень вала і всього обладнання газомасляної системи, що містить турбінне масло;

- відсутність потенційної можливості накопичення воднево-повітряної суміші в замкненому просторі;

- дотримання безпечного порядку заповнення корпусу ТГ воднем і видалення останнього – тільки через заміщення інертним газом, тощо.

Вказані принципи відображені в проектно-конструкторській і технологічній документації та інших керівних нормативних матеріалах, що відносяться до виготовлення, монтажу, експлуатації і ремонту ТГ і його газомасляної системи. Досягнутий рівень реалізації вказаних принципів забезпечив високу надійність турбогенераторів з водневим охолодженням, які експлуатуються в Україні і за кордоном.

Разом з тим, досвід експлуатації енергоблоків, на яких встановлені турбогенератори з водневим охолодженням, показав, що мали місце неодноразові аварії з виходом водню з корпусу турбогенератора. Ці порушення можна розділити за причинами їх виникнення на [1], [3–7]:

- виток через фланцеві з'єднання трубопроводів і штуцери – 20%;

- видавлювання ущільнюючих гумових прокладок (кришки люка, фланца корпусу ТГ, між корпусом ущільнення і торцевим щитом тощо) – 20%;

- прорив через поплашковий гідрозатвор – 10%;

- виток через ущільнюючі гумові прокладки газоохолоджувачів – 10%;

- виток або прорив в картери підшипників – 9%;

- виток через зварні з'єднання трубопроводів – 6%;

- виток через фланцеві з'єднання поплашкового гідрозатвору – 6%;

- порушення роботи регуляторів перепаду тисків масла і водню, регуляторів тиску прижимаючого масла – 6%;

- виток через горизонтальні роз'єми торцевих щитів – 3%.

Найбільш небезпечним порушенням з аварійними наслідками був виток водню із-за руйнування газомасляних ущільнень.

Причиною таких аварій було лавиноподібне підвищення вібрації валопроводу зверх допустимих меж із-за обриву лопаток, яке призвело до руйнування ущільнень і інтенсивному виходу водню з корпусу турбогенератора.

При цьому мало місце займання водню. При змішуванні палаючого водню з турбінним маслом, що витікає із зруйнованих із-за вібрації маселосистем, утворювався газомасляний факел з температурою більше 2000°C, висота якого досягала металевих ферм та інших металоконструкцій даху машзала.

В результаті впливу цієї температури металоконструкції втрачали стійкість та ставалося їх обрушення.

На рисунку 1 показано пожежу, яка сталася у 2013 році на Вуглегірській ТЕС та наведено зовнішній вигляд зруйнованого пожежою машинного залу.

Статистика аварій з пожежами і руйнуванням машинного залу свідчить про те, що:

1. Пожежі в турбінному відділенні виникають з причини:

- недостатньої кваліфікації експлуатаційного оперативного персоналу;

- низької якості ремонту, помилок ремонтного персоналу і порушень ними технічних вимог щодо ремонту обладнання і систем;

- недоліків конструкції обладнання і забезпечуючих його роботу систем.

2. Порушення в газомасляній системі і ущільнень валів генераторів без їх пошкодження є першопричиною масштабних пожеж.

3. Найбільшу небезпеку по швидкості і масштабності представляють аварії з обривом лопаток турбіни, все зростаючої при цьому вібрацією роторів валопроводу турбогенератора, пошкодженням його підшипників і ущільнень валу генератора і виникненням пожежі.

Розподіл катастрофічних ситуацій в машинних залах по першопричинам наведений в таблиці 1.



Рис. 1. Пожежа, яка сталася у 2013 році на Вуглегірській ТЕС та зовнішній вигляд зруйнованого пожежою машинного залу

Таблиця 1

Розподіл катастрофічних ситуацій в машинних залах по першопричинам

Першопричина	Наслідки	Кількість аварій	
		ТЕС	АЕС
Механічне руйнування обладнання турбоагрегатів	Пожежа з обваленням покрівлі; загибель двох осіб	18	1
Розуцільнення маслосистем турбоагрегатів	Пожежа з обваленням покрівлі	5	1
Розуцільнення систем водневого охолодження ТГ	Пожежа з обваленням покрівлі	2	0
	Вибух воднево-повітряної суміші і пожежа	2	0
	Вибух воднево-повітряної суміші; загибель двох осіб	1	0
Помилкові дії персоналу при переводі ТГ з водню на повітря	Вибух воднево-повітряної суміші; загибель однієї особи	1	0
Руйнування вимикача і горіння кабельних трас з розповсюдженням на маслобак і уздовж машзала	Пожежа на великій площі мазала, втрата керованості станції	1	0
Разом:		30	2

Таблиця 2

Розподіл катастрофічних ситуацій в машинних залах, що відбулися внаслідок механічного руйнування обладнання турбоагрегатів

Першопричина	Наслідки	Кількість аварій	
		ТЕС	АЕС
Розбалансування валопроводу з-за пошкодження турбіни, що привела до різкого зростання вібрації валу і пошкодженню підшипників	Пожежа з обваленням покрівлі; загибель двох осіб	10	0
Пошкодження підшипників при розгоні турбіни	Пожежа з обваленням покрівлі	2	0
Руйнування бандажного кільця ротору ТГ	Пожежа з обваленням покрівлі	3	0
Різде зростання вібрації підшипників з-за переходу ТГ в асинхронний режим	Пожежа з пошкодженням покрівлі	1	0
Поломка валу з-за неправильної зборки муфти з'єднання роторів турбіни і генератору	Пожежа з пошкодженням покрівлі	1	0
Різде зростання вібрації підшипників з-за переходу ТГ в режим асинхронного двигуна	Пожежа з обваленням покрівлі	1	1
Разом:		18	1

Більш детально розподіл першопричин зсередини вказаних груп показано в таблицях 2–3.

Розуцільнення високонапірних маслопроводів турбіни або живильних турбонасосів

Статистична інформація про пожежі в машинних залах електростанцій показує, що значна частина (близько 20 %) першопричин полягає у витіках турбінного масла, як правило, з напірних

**Розподіл катастрофічних ситуацій в машинних залах,
що відбулися внаслідок Розуцільнення маслосистем турбоагрегатів**

Першопричина	Наслідки	Кількість аварій	
		ТЕС	АЕС
Викид масла з високонапірних маслопроводів	Пожежа з обваленням покрівлі	4	1
Виток і попадання масла на паропроводи	Пожежа з обваленням покрівлі	1	0
Горіння і розтікання масла з маслобаку	Пожежа на великій площі	1	0
Разом:		6	1

Таблиця 4

**Розподіл катастрофічних ситуацій в машинних залах,
що відбулися внаслідок Розуцільнення систем водневого охолодження ТГ**

Першопричина	Наслідки	Кількість аварій	
		ТЕС	АЕС
Розгерметизація виводів ТГ, виток водню в кожухи екранованих струмопроводів	Вибух воднево-повітряної суміші і пожежа	2	0
Застрявання вкладиша ущільнення, вихід водню під декоративну обшивку і накопичення його	Вибух воднево-повітряної суміші; загибель двох осіб	1	0
Порушення газощільності прохідного ізолятора водопідведення обмотки статора, викид водню	Пожежа з обваленням покрівлі	1	0
Руйнування ущільнень валу і викид водню і масла при короткому замиканні обмотки статора ТГ	Пожежа з обваленням покрівлі	1	0
Утворення воднево-повітряної суміші в ТГ внаслідок помилкових дій персоналу	Вибух воднево-повітряної суміші; загибель однієї особи	1	0
Разом:		6	0

маслопроводів і їх арматури систем змазування і систем регулювання. Загоряння масла зазвичай стається тоді, коли масло витікає або розбризкується на відкриту поверхню паропроводів або вузлів їх з'єднання, температура яких перевищує температуру займання масла. Якщо ж масло потрапляє на поверхню теплоізоляції, яка є пористим матеріалом, то просочення теплоізоляції і насичення її маслом приводе з часом до самозаймання масла. Масло просочується в теплоізоляцію на значну відстань, тобто загоряння масла може статися в обшивці далеко від місця витoku.

Особливу небезпеку у відношенні пожежі представляють собою системи регулювання турбін з високим тиском масла. Виток з такої системи супроводжується фонтануванням масла. Загоряння фонтануючого масла приводе до швидкого розповсюдження горіння на обладнання машинного залу і на його будівельні конструкції, що веде зазвичай до обвалення ферм перекриття покрівлі. Характерними є події, вказані в таблиці 1, аналіз деяких з них приводиться нижче.

Викид масла з подальшим займанням стався при ремонті механізму управління турбіни живильного турбонасоса на Екібастузькій ГРЕС-1 (Казахстан) в жовтні 1984 року. Внаслідок пожежі в машинному залі сталося обвалення перекриттів покрівлі, згоріла м'яка покрівля і утеплювач. Пошкоджені ТГ № 5 і № 6.

Вогонь, що проник в кабельні канали, знищив багато силових і контрольних кабелів.

Відрив запобіжного клапана на трубопроводі системи регулювання привів до викиду масла з маслобака турбіни турбоагрегату № 1 Миронівської ГРЕС (Україна) (травень 1981 року) з наступним займанням і пожежою в районі маслобака. Пожежа швидко розповсюдилась на площадку обслуговування турбіни № 1, в результаті чого був пошкоджений генератор і обвалились перекриття покрівлі машинного залу.

Пожежа в районі напірного маслопроводу підшипника № 1 турбоагрегату № 3 Слов'янської ГРЕС (Україна) (серпень 1986 року) виникла внаслідок самовідгвинчування гайки-гільзи температурного контролю, викиду і загоряння масла. В результаті температурних впливів факела масла, що горить сталися деформація нижнього поясу ферми покрівлі і падіння окремих плит перекриття на площадку обслуговування турбіни.

Розуцільнення систем водневого охолодження ТГ

Розуцільнення корпусу ТГ і пов'язаної з ним газомасляної системи приводе до витoku водню в машинний зал, при цьому кількість водню, що виходе в одиницю часу, залежить від площі поперечного перетину щілини або отвору що утворилися і тиску водню в корпусі ТГ. Небезпечними наслідками витoku можуть бути загоряння або

накопичення воднево-повітряної суміші з «хлопком» або вибухом в залежності від концентрації і об'єму суміші.

Аналіз причин вибухів показав явні порушення основного принципу забезпечення вибухонебезпеки ТГ з водневим охолодженням – недопущення потенційної можливості накопичення воднево-повітряної суміші в замкненому просторі або просторі, що погано вентилюється.

Так, в двох випадках вибух воднево-повітряної суміші стався в кожухах комплектних екранованих струмопроводів, куди водень проник через пошкоджені гумові ущільнюючі прокладки ізоляторів лінійних виводів обмотки статора ТГ.

На ТГ № 8 (100 МВт) Карагандинської ГРЕС-2 (Казахстан) в 1991 році виток і самозаймання водню привели до вибуху воднево-повітряної суміші в струмопроводі, однак без тяжких наслідків.

Один вибух стався на блоці №3 Тбіліської ГРЕС (Грузія) в 1985 році після виводу в ремонт ТГ типу ТВВ-165-2. При витісненні водню вуглекислим газом і подальшим заповненням корпусу повітрям був відсутнім належний контроль складу газу зсередини ТГ. При неповному витісненні водню були початі зварювальні роботи на трубопроводах газоохолоджувача. В результаті стався вибух воднево-повітряної суміші в корпусі ТГ, який привів до пошкодження ТГ і загибелі зварювальника.

Інші аварійні ситуації з порушенням газощільності ТГ полягали у викиді і загорянні водню (без вибуху). В двох випадках розвиток загоряння в пожежу водню і масла, потім розповсюдження пожежі в машинному залі привело до пошкодження обладнання систем збуджування, контрольних і силових кабелів, підкранових шляхів і ферм перекриттів покрівлі над ТГ. Це сталося на ТГ № 7 Тбіліської ГРЕС (Грузія) в 1987 році і на ТГ № 4 Одеської ТЕЦ (Україна) в 1989 році, причому в останньому випадку мало місце обвалення покрівлі машинного залу.

Крім вищенаведених катастрофічних подій, в період, що розглядається на теплових електростанціях зафіксовано 28 аварійних ситуацій з витоків і локальними загоряннями водню, своєчасна ліквідація яких не дала витоків розвинути в пожежі з тяжкими наслідками. Кількості цих

загорянь розподіляються по причинах наступним чином:

- витоків водню через виводи ТГ – 7;
- виток через ущільнення валу в картери підшипників – 4;
- виток через прокладку фланца – 3;
- виток через газовий вентиль – 2;
- інші витоків (причина невідома) – 1.

На АЕС також мали місце витоків водню на ТГ з локальними загоряннями і локальними вибухами («хлопками»), але оскільки були своєчасно прийняті міри, вони не приводили до тяжких наслідків і пожеж.

Вони розподіляються за причинами наступним чином:

- виток водню через дефектний вентиль – 5;
- виток водню через поплавковий гідрозатвор ЗГ-500 – 3;
- виток через ущільнення в картер підшипника – 1;
- виток через прокладку фланца торцевого щита – 1;
- інші (тріщина, свищ) – 2.

Досить багато загорянь на ТЕС і АЕС відбувалося з-за витоків водню через дефектні вентиля. Самі по собі ці загоряння не розвивались в пожежі, але існує потенційна імовірність такого розвитку. На АЕС в трьох випадках з п'яти порушення виникали при відборі проб газу на аналіз шляхом відкриття вентилів на газовому посту, при цьому була серйозна небезпека травмування людини. Це було пов'язано з порушенням інструкцій, зокрема, вимоги про відбір проб двома робітниками.

Висновки

1. В результаті проведеного аналізу встановлено причини можливих пожеж в машинних залах енергетичних підприємств.

2. Проблема забезпечення пожежної безпеки машинних залів енергетичних підприємств на теперішній час залишається актуальною та потребує проведення подальших досліджень. Всі отримані результати вказаного аналізу, повинні бути покладені в основу розробки відповідних заходів щодо запобігання виникнення пожеж в машинних залах електростанцій та розробки пропозицій щодо вдосконалення існуючої системи їх протипожежного захисту.

Список літератури:

1. Семичаєвський, С.В., Щодо пожежної безпеки машинних залів енергетичних підприємств / С.В. Семичаєвський., І.Г. Стилик, В.В. Свірський, Б.О. Алімов // *Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. 2021. Том 32 (71) № 6. С. 145–150.
2. Семичаєвський, С.В., Дослідження сценаріїв можливих пожеж в машинних залах атомних і теплових електростанцій / С.В. Семичаєвський., Т.В. Самченко // *Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. 2023. Том 34 (73) № 2. С. 281–287.

3. Кирилів, Я.Б., Аналіз пожежної безпеки машинних залів атомних електростанцій / Я.Б. Кирилів., С.І. Білик, О.В. Хлевной // *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2018. № 6. С. 150–156.

4. International Guidelines for Fire Protection of Nuclear Power Plants. Published on behalf of NUCLEAR POOL'S FORUM. Revised Edition 1997. AMERICAN NUCLEAR INSURERS Town Center, Suite 300S, 29 South Main Street West Hartford, Connecticut 06107-2430 U.S.A.

5. Regulatory Guide 1.189 Fire Protection for Operating Nuclear Power Plants NRC Information Notice 2002-27: Recent Fires at Commercial Nuclear Power Plants in the United States.

6. Nuclear Insurance Fire Risk Edgar Dressler (American Nuclear Insurers), ICONE 9, Nice, France, 2001.

7. V.F. Nicolette, S.P. Nowlen, Fire models for assessment of nuclear power plant fires, *Nuclear Engineering and Design* 125 (1991) 389–394.

Semychayevsky S.V., Samchenko T.V. ANALYSIS OF CAUSES OF POSSIBLE FIRES IN MACHINE ROOMS OF ENERGY ENTERPRISES

This publication presents the relevance of the issue of ensuring fire safety of engine rooms of energy enterprises. Attention is drawn to the fact that the presence of flammable and explosive hydrogen in the cooling systems of turbine generators in combination with flammable oil, the auto-ignition temperature of which is significantly lower than that of hydrogen, actually constitutes a problem of ensuring explosion and fire safety in power plant halls.

An analysis of the causes of possible fires in the engine rooms of NPPs and TPPs was carried out. The experience of operation of power units on which hydrogen-cooled turbogenerators are installed showed that the most dangerous violation with emergency consequences was the leakage of hydrogen due to the destruction of gas-oil seals. The cause of such accidents was an avalanche-like increase in the vibration of the shaft pipeline beyond the permissible limits due to the breakage of the blades, which led to the destruction of the seals and the intensive release of hydrogen from the turbogenerator housing. At the same time, hydrogen ignition took place. When burning hydrogen was mixed with turbine oil flowing out of oil systems destroyed due to vibration, a gas-oil torch with a temperature of more than 2000°C was formed, the height of which reached the metal trusses and other metal structures of the mashzal roof.

Corresponding tables with information on the distribution of catastrophic situations in engine rooms by root causes, etc., are provided. It is noted that turbine control systems with high oil pressure represent a particular fire hazard. A leak from such a system is accompanied by gushing oil. Ignition of gushing oil leads to the rapid spread of burning to the equipment of the engine room and its building structures, which usually leads to the collapse of the roof trusses. Decompression of the turbogenerator housing and the gas-oil system associated with it leads to the leakage of hydrogen into the engine room, while the amount of hydrogen released per unit of time depends on the cross-sectional area of the gap or hole formed and the hydrogen pressure in the turbogenerator housing. Dangerous consequences of a leak can be ignition or accumulation of a hydrogen-air mixture with a “clap” or explosion, depending on the concentration and volume of the mixture.

Key words: *causes of possible fires, energy companies, engine rooms, fires, hydrogen, oil, turbogenerators.*

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 621.74: 669

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/11>**Босий М.В.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

Кропивний В.М.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Кузик О.В.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Кропивна А.В.

Центральноукраїнський національний технічний університет

ДО ПИТАННЯ ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ НА СТРУКТУРУ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СІРОГО ЧАВУНУ

Застосування виливків із сірого чавуну в машинобудівній промисловості дає змогу підвищити зносостійкість і експлуатаційні властивості конструкцій та деталей машин, що, в свою чергу, також підвищує їх надійність для галузі машинобудування. Наразі значно виріс інтерес до проблем лиття чавуну, тобто формування структури і механічних властивостей. Важливим показником якості сірого чавуну є його механічні властивості, які залежать від його хімічного складу і структури та визначених технологічних процесів. У статті досліджено вплив хімічного складу сірого чавуну на структуру та його механічні властивості. Дослідження виконувались методами математичної статистики, тобто методом найменших квадратів і кореляційним аналізом в середовищі Microsoft Office Excel та MathCAD. Отримані рівняння регресії залежностей механічних властивостей сірого чавуну від його хімічного складу, при цьому встановлена тіснота зв'язку між досліджуваними параметрами і встановлено характер впливу вуглецю, кремнію, марганцю, сірки на механічні властивості сірого чавуну, а також встановлений оптимальний склад чавуну. Показано, що суттєвий вплив на механічні властивості має сумарний вміст вуглецю і кремнію, це дозволяє регулювати хімічний склад для поліпшення міцності і твердості виливків із сірого чавуну. Запропоновано оптимальний хімічний склад сірого чавуну для дослідження механічних властивостей. На основі проведених досліджень для підвищення механічних властивостей сірого чавуну пропонується за критерій оцінки хімічного складу чавуну прийняти: вуглецевий еквівалент; сумарний вміст вуглецю і кремнію; вміст марганцю і сірки окремо. Для одержання сірого чавуну з підвищеними механічними властивостями вуглецевий еквівалент повинен знаходитись в інтервалі 3,6–4,2%, що відповідає вмісту вуглецю 3,1–3,75%, кремнію 1,9–2,5%, вміст марганцю повинен бути в інтервалі 0,45–0,75%, а сірки 0,04–0,14% згідно ДСТУ8833.

Ключові слова: сірий чавун, хімічний склад, механічні властивості, рівняння регресії, кореляція, метод найменших квадратів.

Постановка проблеми. Використання сірого чавуну в різних галузях промисловості України дозволяє підвищити надійність, зносостійкість і експлуатаційні показники як конструкцій, так і деталей машин. В зв'язку з цим в технологічних процесах одержання чавунного литва необхідно застосовувати певні прийоми і методи регулювання форми та характеру розподілу графітної фази в структурі виливків [1–4, 7].

Теорія кристалізації є важливою складовою при аналізі процесів формування структури і механічних властивостей, тому велика увага приділяється вивченню закономірностей структури і механічних властивостей в залежності від хімічного складу чавуну [1–4, 7].

Під час отримання чавунного литва необхідно приділяти увагу прийомам та методам коригування хімічного складу чавуну, за допомогою яких

регулюється хімічний склад, а також структура виливків з метою покращення їх якості [1–4, 7].

Тому питання стосовно вивчення впливу на механічні властивості виливків із сірого чавуну хімічного складу є актуальним, а робота, яка спрямована на підвищення його міцності і твердості виливків в залежності від хімічного складу наразі є також актуальним науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Натепер значно зростає інтерес до процесів лиття чавунів, формування структури та їх механічних властивостей.

При аналізі літературно інформаційних джерел стосовно вивчення впливу на механічні властивості хімічного складу чавуну вказується на широке застосування в машинобудівній галузі зносостійких матеріалів деталей, які створені на основі сірих чавунів [1–4, 7].

Для аналізу технологічних процесів формування структури сірого чавуну може слугувати теорія кристалізації. Вивчення її при процесах лиття тісно пов'язано з дослідженням закономірностей зміни структури і механічних властивостей в залежності від хімічного складу чавуну при різних температурах і фазових станах [1–4, 7].

Тому, наразі актуальним питанням є вивчення впливу хімічного складу як на структуру, так і на механічні властивості сірого чавуну.

Метою статті є вивчення впливу хімічного складу на структуру та механічні властивості сірого чавуну.

Виклад основного матеріалу. Матеріалом дослідження в нашій роботі є сірий чавун з відповідним хімічним складом ДСТУ 8833: 3,1–3,7 % C; 1,9–2,5 % Si; 0,45–0,75 % Mn; 0,04–0,14 % S; 0,2 % P, який виплавляється в індукційно тигельній печі [1, 7, 9].

Вивчення впливу хімічного складу на механічні властивості сірого чавуну виконувалось за допомогою методу найменших квадратів (МНК), теорії кореляції та регресійного аналізу [5–7].

Залежність міцності і твердості сірого чавуну від хімічного складу шукаємо у вигляді наступних функцій: лінійної, поліноміальної другого ступеня, поліноміальної третього ступеня [5–7]:

Рівняння регресії, тобто (математичні моделі) залежностей механічних властивостей сірого чавуну від хімічного складу отримуємо, використовуючи методи кореляційного і регресійного аналізу. Обробка даних у відповідності з методом найменших квадратів виконана для залежностей міцності та твердості сірого чавуну від хімічного складу. Розрахунки з використання методів математичної статистики при вивченні впливу хімічного складу на механічні властивості та структуру сірого

чавуну виконували в пакеті програми MathCad. Для здійснення дисперсійного, кореляційного і регресійного аналізу з оцінкою значущості коефіцієнтів одержаних рівнянь регресії використовували програму Microsoft Office Excel [5–8].

Виконавши відповідні розрахунки із застосуванням теорії кореляції та методу найменших квадратів, отримали рівняння регресії залежностей впливу хімічного складу на механічні властивості сірого чавуну [5–8]. Наприклад, для міцності сірого чавуну:

$$\sigma_b = f(C)$$

$$\sigma_b = -7,79C + 42,85$$

$$\sigma_b = 0,94C^2 - 15,0C + 54,98 \quad (1)$$

$$\sigma_b = 0,98C^3 - 7,88C^2 + 16,0C + 22,99$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,28; 0,27; 0,27$$

$$\sigma_b = -1,72 Si + 18,0$$

$$\sigma_b = f(Si) \quad \sigma_b = 0,45Si^2 - 3,34Si + 20,1 \quad (2)$$

$$\sigma_b = 1,97Si^3 - 10,98Si^2 + 20,73Si + 3,45$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,14; 0,14; 0,14$$

$$\sigma_b = f(C + Si)$$

$$\sigma_b = 2,57(C + Si) + 28,34$$

$$\sigma_b = 1,21(C + Si)^2 - 15,87(C + Si) + 70,21 \quad (3)$$

$$\sigma_b = 0,00045(C + Si)^3 + 1,31(C + Si)^2 + 16,86(C + Si) + 69,72$$

коефіцієнти кореляції $r = 0,25; 0,26; 0,25$

$$\sigma_b = 2,11Mn + 12,78$$

$$\sigma_b = f(Mn) \quad \sigma_b = 1,043Mn^2 - 0,009Mn + 13,73 \quad (4)$$

$$\sigma_b = 2,27Mn^3 - 6,52Mn^2 + 7,63Mn + 11,35$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,14; 0,15; 0,15$$

$$\sigma_b = 26,19S + 11,25$$

$$\sigma_b = f(S) \quad \sigma_b = 171,72S^2 - 15,85S + 13,72 \quad (5)$$

$$\sigma_b = 324,1S^3 - 192,42S^2 + 12,65S + 13,71$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,18; 0,20; 0,19$$

$$\sigma_b = 6,78C_E + 44,85$$

$$\sigma_b = f(C_E) \quad \sigma_b = 3,28C_E^2 - 36,1C_E + 105 \quad (6)$$

$$\sigma_b = 0,23C_E^3 - 0,52C_E^2 - 14,98C_E + 71,89$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,33; 0,32; 0,32$$

$$\sigma_b = f(S_E) \quad \begin{aligned} \sigma_b &= -6,18S_E + 45,41 \\ \sigma_b &= 3,18S_E^2 - 34,70S_E + 48 \\ \sigma_b &= 0,23S_E^3 - 0,52S_E^2 - 14,98S_E + \\ &+ 72,98 \end{aligned} \quad (7)$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,15; 0,16; 0,16$$

Для твердості сірого чавуну:

$$HB = 38,78C + 306$$

$$HB = f(C) \quad \begin{aligned} HB &= 43,35C^2 - 351,48C + 867 \\ HB &= 9,36C^3 - 52,24C^2 + 47,25 + \\ &+ 550 \end{aligned} \quad (8)$$

коефіцієнти кореляції $r = 0,20; 0,18; 0,18$

$$HB = f(Si)$$

$$HB = 15,42Si + 196$$

$$HB = -3,59 \cdot Si^2 - 0,35 \cdot Si + 180$$

$$HB = 14,28Si^3 - 93,81Si^2 + \\ + 183,73Si + 55,25 \quad (9)$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,19; 0,18; 0,18$$

$$HB = f(Mn)$$

$$HB = 14,10Mn + 165,78$$

$$HB = 15,88Mn^2 - 15,98Mn + 165,75 \quad (10)$$

$$HB = 15,53Mn^3 - 37,85Mn^2 +$$

$$+ 37,14Mn + 149,65$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,15; 0,14; 0,14$$

$$HB = f(S)$$

$$HB = 195,35S + 140,35$$

$$HB = 2489S^2 - 427S + 178,8 \quad (11)$$

$$HB = -63801S^3 + 33488S^2 +$$

$$+ 3277,8S + 290$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,23; 0,22; 0,25$$

$$HB = f(C + Si)$$

$$HB = -20,29(C + Si) + 279,96$$

$$HB = 2,28(C + Si)^2 - \\ - 46,35(C + Si) + 354 \quad (12)$$

$$HB = 0,49(C + Si)^3 + 10,98(C + Si)^2 -$$

$$- 97,3(C + Si) + 453$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,27; 0,25; 0,25$$

$$HB = f(C_E)$$

$$HB = -45,31C_E + 363,18$$

$$HB = 33,98C_E^2 - 337,89C_E + \\ + 983,37 \quad (13)$$

$$HB = -3,32C_E^3 - 17,89C_E^2 -$$

$$- 67,78C_E + 550$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,31; 0,28; 0,28$$

$$HB = -54,73S_E + 245,14$$

$$HB = f(S_E) \quad \begin{aligned} HB &= 1098S_E^2 - 1589S_E + 789,28 \\ HB &= -105,48S_E^3 - 1315,7S_E^2 - \\ &- 1825S_E + 833 \end{aligned} \quad (14)$$

$$HB = -105,48S_E^3 - 1315,7S_E^2 -$$

$$- 1825S_E + 833$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,16; 0,14; 0,13$$

$$\sigma_b = 0,104HB - 4,37$$

$$\sigma_b = f(HB) \quad \begin{aligned} \sigma_b &= 0,0006HB^2 - 0,073HB + 11,15 \\ \sigma_b &= 0,000043HB^3 + 0,00275HB^2 - \\ &- 0,398HB + 21,43 \end{aligned} \quad (15)$$

$$- 0,398HB + 21,43$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,75; 0,75; 0,76$$

Аналізуючи рівняння регресії (1–15), встановлено, що коефіцієнти кореляції і кореляційні відношення відрізняються один від одного несуттєво. Майже всі розраховані коефіцієнти кореляції статистично значимі.

Збільшення вмісту вуглецю і кремнію знижує міцність і твердість сірого чавуну, а сумарний вміст вуглецю і кремнію суттєво знижує міцність і твердість сірого чавуну.

Зі збільшенням вмісту марганцю і сірки в чавуні спостерігається збільшення його міцності і твердості. Але вплив сірки суттєвіший, ніж марганцю, це підтверджується більш високими коефіцієнтами кореляції.

З аналізу рівнянь регресії також видно, що зі збільшенням вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності міцність і твердість сірого чавуну знижується, а коефіцієнти кореляції значимі.

Виходячи із аналізу рівнянь регресії видно, що залежність між міцністю і твердістю сірого чавуну $\sigma_b = f(HB)$ характеризується високою тісністю зв'язку, оскільки коефіцієнт кореляції дорівнює $r = 0,75$.

Висновки

1. На механічні властивості сірого чавуну вуглець має найбільш суттєвий вплив, ніж кремній. Також значний вплив має сумарний вміст вуглецю і кремнію та вуглецевий еквівалент. Вплив ступеня евтектичності менш значний. Сірка впливає більш суттєво, ніж марганець.

2. Запропоновано відповідно оптимальний хімічний склад сірого чавуну для дослідження механічних властивостей та отримані рівняння регресій залежностей механічних властивостей сірого чавуну від хімічного складу.

Список літератури:

1. Скобло Т.С., Сідашенко О.І., Сайчук О.В. Корпусні деталі з чавунів та їх якісні показники: монографія. Х: Діса плюс, 2019. 282 с.
2. Сіренко К.А. Удосконалена технологія коригування хімічного складу чавуну під час плавки в індукційно-тигельних печах. *Процеси лиття*. 2022. № 1(147). С. 3–10.
3. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Оцінка стабільності хімічного складу і механічних властивостей промислових партій синтетичного чавуну. *Процеси лиття*. 2021. № 4(146). С. 66–75.
4. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Визначення вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавуну в ливарному виробництві. *Процеси лиття*. 2023. № 1(151). С. 20–34.
5. Бахрушин В.С. Методи аналізу даних: навч. посіб. Запоріжжя: КПУ, 2011. 268 с.
6. Василенко О.А., Сенга І.А. Математично-статистичні методи аналізу у прикладних дослідженнях: навч. посіб. Одеса: ОНАО ім. О.С. Попова, 2011. 166 с.
7. Босий М.В., Шевченко Б.П., Герасименко І.О., Ботнарченко В.О., Авраменко В.О., Шуть А.О. Дослідження впливу хімічного складу на механічні властивості виливків із сірого чавуну методами математичної статистики. The 8th International scientific and practical conference “Modern problems of science, education and society” (October 9–11, 2023) SPC “Sciconf.com.ua”. Kyiv, Ukraine. 2023. P. 250–258.
8. Назаренко Н. Можливості математичного пакету MATHCAD. Збірник тез II Української конференції молодих науковців. Київ. 2015. С. 181–183.
9. Національний стандарт України. ДСТУ8833. Виливки із сірого чавуну з пластинчастим графітом. Загальнотехнічні умови. 2019. С. 7.

Bosyi M.V., Kropivnyi V.M., Kuzyk O.V., Kropivna A.V. ON THE STUDY OF THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF GRAY IRON

The use of gray iron castings in the machine-building industry makes it possible to increase the wear resistance and operational properties of machine structures and parts, which in turn, also increases their reliability for the machine-building industry. At present, interest in the problems of cast iron, that is, the formation of structure and mechanical properties, has grown significantly. An important indicator of the quality of gray cast iron is its mechanical properties, which depend on its chemical composition and structure and certain technological processes. The article examines the influence of the chemical composition of gray cast iron on its structure and mechanical properties. Research was carried out using the methods of mathematical statistics, that is, the method of least squares and correlation analysis in Microsoft Office Excel and MathCAD. The regression equations of the dependences of the mechanical properties of gray cast iron on its chemical composition were obtained, while the closeness of the connection between the studied parameters was established, and the nature of the effect of carbon, silicon, manganese, sulfur on the mechanical properties of gray cast iron was established, as well as the optimal composition of cast iron was established. It is shown that the total content of carbon and silicon has a significant effect on the mechanical properties, this allows to adjust the chemical composition to improve the strength and hardness of gray iron castings. The optimal chemical composition of gray cast iron for the study of mechanical properties is proposed. On the basis of the conducted research, in order to improve the mechanical properties of gray cast iron, it is proposed to adopt the following criterion for evaluating the chemical composition of cast iron: carbon equivalent; total carbon and silicon content; manganese and sulfur content separately. To obtain gray cast iron with increased mechanical properties, the carbon equivalent should be in the range of 3.6–4.2%, which corresponds to the carbon content of 3.1–3.75%, silicon 1.9–2.5%, the manganese content should be in interval 0.45–0.75%, and sulfur 0.04–0.14% according to DSTU8833.

Key words: gray cast iron, chemical composition, mechanical properties, regression equation, correlation, method of least squares.

УДК 669.097.243.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/12>**Єфімова В.Г.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Смірнов Ю.О.**

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України

Пилипенко Т.М.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**ВИДАЛЕННЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ З РОЗПЛАВУ СТАЛІ
У ПРОМІЖНОМУ КОВШІ ЗА РАХУНОК ЇХ АБСОРБЦІЇ
ШЛАКОВОЮ ФАЗОЮ**

У цьому дослідженні показано, що утворення неметалевих включень у процесі виробництва сталі є неминучим і якщо не контролювати їх кількість, то можуть виникнути проблеми, що пов'язані з продуктивністю та виробництвом.

Доведено, що шлак являє собою один з доступних ресурсів для здійснення контролю неметалевих включень у розплаві сталі. При цьому у роботі показано, що розподіл та адсорбція можуть визначати спроможність шлаку поглинати неметалеві включення.

В результаті проведених досліджень встановлено умови коли неметалеві включення залишаються на межі поділу фаз розплав сталі – шлак у проміжному ковші МБРЗ при безперервному розливання сталі.

В роботі показано, що затримка неметалевої фази на межі поділу розплав сталі – шлак може призвести до захоплення частинок неметалевих включень у глибину розплаву.

Дослідженнями встановлено основні параметри, що впливають на процес адсорбції неметалевих включень шлаковою фазою, а саме, розмір частинок, швидкість їх спливання, поверхневий натяг на межі поділу фаз метал-шлак, а також в'язкість шлаку.

Показано, що швидкість захоплення твердих частинок оксидних включень з розплавленої сталі розплавленим шлаком залежить від швидкості стікання металевої плівки з їх поверхні (що відбувається при певних швидкостях частинок), величини поверхневого натягу на межі поділу фаз розплав сталі – шлак та швидкості розчинення їх у шлаковій фазі.

З використанням математичних розрахунків показано ймовірність процесу адсорбції оксидних включень розміром від 10 до 100 мкм зі швидкістю спливання від стоксовської до 0,3 м/с до границі поділу фаз розплав сталі – шлакова фаза.

Розрахунки показали, що руйнування та стік металевих плівок з поверхні неметалевих включень відбувається досить швидко і тому їм можна нехтувати.

Фізичне моделювання показало, що на процес відокремлення неметалевих включень від поверхні металу, а потім і перехід у шлакову фазу залежить від величини поверхневої енергії на межі поділу фаз неметалевого включення – шлак. Показано, що мінімальне значення поверхневого натягу для відокремлення неметалевої фази повинно становити 0,41 Н/м.

З використанням скануючого лазерного мікроскопу було проведено дослідження кінцевої стадії видалення неметалевих включень шлаковою фазою, а саме процес адсорбції неметалевої фази і шлаковою фазою.

Дані досліджень свідчать, що спостерігається кореляція між в'язкістю шлаку та його перенасиченням відносно неметалевих включень.

Встановлено час розчинення неметалевих включень у шлаковій фазі в залежності від їх розміру.

Ключові слова: проміжний ковш, неметалеві включення, адсорбція, енергія Гіббса, розплав сталі.

Постановка проблеми. Відомо, що в процесі виробництва сталі відбувається побічний процес утворення неметалевих включень. Якщо його не контролювати належним чином, це може

призвести до зниження якості готової продукції. Одним з доступних методів контролю вмісту неметалевих включень у розплаві сталі є шлак, який за законом розподілу поглинає неметалеві вклю-

чення у процесі їх флотації за рахунок абсорбції. Відомо, що процес видалення неметалевої фази включає в себе три кроки: флотація включень до межі поділу фаз розплав сталі – шлаку, поглинання включень шлаковою фазою та розчинення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні дослідження видалення неметалевої фази з розплаву сталі присвячені оптимізації траєкторії гідродинамічних потоків у металургійних реакторах та транспортуванню неметалевих включень до межі поділу фаз метал – шлак [1, 2].

Найменш вивченою стадією видалення неметалевих включень з розплаву є поглинання неметалевого включення шлаковою фазою. Термодинаміка цього процесу детально представлена у роботах [3–7]. У відповідності цих досліджень перехід неметалевого включення в шлак відбувається при мінімальному значенню вільної енергії системи. Але ця модель дуже спрощена і не враховує той факт, що вільна енергія системи змінюється безперервно на межі поділу фаз метал-включення, включення – шлак.

У дослідженнях [8, 9] показано, що теорія видалення неметалевих включень не враховує утворення тонкої рідкої металевої плівки на поверхні неметалевого включення, що призводить до збільшення часу перебування неметалевих включень на границі поділу фаз.

Дані роботи [10] свідчать, що основні типи включень мають більшу густину ніж металургійні шлаки, а тому вони будуть спинятися на межі поділу фаз метал – шлак, що може призвести до їх вторинного захоплення металевим розплавом.

Отже, робота що спрямована на з'ясування механізму абсорбції включень шлаковою фазою після того як вони досягли міжфазної поверхні поділу метал – шлак та впливу на цей процес розплаву шлаку є актуальною.

Метою даного дослідження було встановлення механізму видалення неметалевих включень за рахунок адсорбції шлаковою фазою.

Реалізація поставленої мети здійснювалась шляхом вирішення наступних завдань:

- фізико-хімічний аналіз адсорбції неметалевих включень шлаком у проміжному ковші;
- моделювання процесу адсорбції неметалевих включень шлаковою фазою, з використанням скоуючого електронного мікроскопу;
- визначення часу адсорбції неметалевих включень шлаком.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо наближення твердої сферичної частинки до хімічно інертної статичної поверхні шлакової фази. Швид-

кість руху включення залежить від числа Рейнольдса і в момент його зіткнення зі шлаковою поверхнею утворюється плівка довільної товщини, яка дренується дією потоку до моменту входу включення у контакт зі шлаковою фазою.

Отже, швидкість спливання частинки неметалевого включення можна представити:

$$U_{кин.} = \frac{2}{9} R_g^2 (\rho_m - \rho_g) \frac{9}{\eta_m} \quad (1)$$

де R_g^2 – радіус неметалевого включення, м; ρ_m – густина розплаву металу, кг/м³; ρ_g – густина неметалевого включення, м; η_m – в'язкість розплаву металу, Па·с.

Число Рейнольдса, для частинки, що видаляється

$$Re = U \cdot 2R_g \cdot \frac{\rho_m}{\eta_m} \quad (2)$$

де U – швидкість руху включення, що дорівнює $U_{кин.}$ та вище та визначається розміром включення, що спливає.

В обох випадках на рух частинок впливають сила капілярної взаємодії $F_{\sigma,z}$, сила виштовхування – F_b , сила опору F_d та сила маси металу, що приєдналася F_m .

У випадку формування металевої плівки на поверхні неметалевого включення рівняння для сили капілярної взаємодії залежить від властивостей розплаву металу та природи неметалевих включень

$$F_{\sigma,z} = 4\pi R_1 \left[\frac{\sigma_{m-w}}{2(R_1 + S)^3} ((2R_1 + S - Z)) + \frac{dZ}{dt} \cdot \frac{\eta_m}{3} \cdot \frac{3}{2} \left(\frac{1}{R_1 + 2S} - \frac{1}{R_1 + 4S} \right) \left(1 - \left(\frac{R_1 - Z}{R} \right) \right) \right] \quad (3)$$

$$F_b = \frac{4}{3} \pi R_g^3 (\rho_m - \rho_g) g \quad (4)$$

$$F_d = 6\pi R_g \eta_m \frac{dZ}{dT} \quad (5)$$

$$F_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi R_g^3 \rho_m \frac{d^2 Z}{dt^2} \quad (6)$$

де σ_{m-w} – поверхневий натяг на межі поділу фаз, Н/м²; $\frac{dZ}{dT}$ та $\frac{d^2 Z}{dt^2}$ – швидкість та прискорення включення, коли воно досягає шлакової фази, м/с та м/с²; S – товщина плівки металу на поверхні неметалевого включення, що спливає з початковою товщиною $0,002 \cdot R_g$ та при значенні $0,001 \cdot R_g$ відбувається її розрив у м; g – прискорення сили тяжіння м/с² [7].

Капілярні сили будуть намагатися виштовхнути включення за рахунок утворення нової області між металом та шлаком. Оскільки металевий розплав являє собою мало в'язку рідину, то злив металевої плівки відбувається швидко та його можна не враховувати. При цьому важливу роль буде відігравати змочування включення шлаком.

При взаємодії неметалевого включення з шлаковою фазою і металевим розплавом діють наступні сили:

$$F_{\sigma,Z} = (-2\pi R_g + 2\pi Z)\sigma_{m-u} + 2\pi R_g\sigma_{ш-г} - 2\pi R_g\sigma_{m-г} \quad (7)$$

$$F_b = \frac{4}{3}\pi R_g^3(\rho_{ш}\Delta_b - \rho_g)g \quad (8)$$

$$F_d = 6\pi R_g\eta_{ш}B_2\frac{dZ}{dt} \quad (9)$$

$$F_m = \frac{1}{2}\frac{4}{3}\pi R_g^3\rho_{ш}\Delta_b\frac{d^2Z}{dt^2} \quad (10)$$

де ρ_g та $\rho_{ш}$ – густина неметалевих включень та шлаку, відповідно у кг/м³; $\sigma_{ш-г}$ та $\sigma_{m-г}$ – поверхневий натяг на межі поділу фаз шлак – неметалеве включення та розплав металу – шлак, Н/м²; B_2 та Δ_b – коефіцієнти пропорційності.

$$\Delta_b = \frac{1}{4}\left(\frac{\rho_m}{\rho_{ш}} - 1\right)\left(\frac{Z}{R_g}\right)^3 - \frac{4}{3}\left(\frac{\rho_m}{\rho_{ш}} - 1\right)\left(\frac{Z}{R_g}\right)^2 + \frac{\rho_m}{\rho_{ш}} \quad (11)$$

$$B_2 = 1 \text{ у випадку, коли } \frac{Z}{R_g} \geq 1.$$

За умови, що $0 \leq \frac{Z}{R_g} \leq 1$

$$B_2 = \left(\frac{\eta_m}{\eta_{ш}} - 1\right)\left(\frac{Z}{R_g}\right)^2 - 2\left(\frac{\eta_m}{\eta_{ш}} - 1\right)\left(\frac{Z}{R_g}\right) + \frac{\eta_m}{\eta_{ш}} \quad (12)$$

З наведених рівнянь випливає, що сила капілярної взаємодії домінує над силою відділення неметалевих включень від поверхні металу. Це пояснюється тим, що оксидні включення краще будуть взаємодіяти з розплавом оксидів у шлаку ніж з розплавом металу.

Сила виштовхування залежить від різниці густини розплаву металу та неметалевого включення. Отже, неметалеві включення, що спливли з об'єму металу, однією своєю частиною залишаються у металевому розплаві, іншою – у шлаковій фазі.

Отже, коли неметалеві включення перебувають на поверхні шлакової фази існує ризик їх повторного захоплення у глибину розплаву металу.

Для того щоб розглянути класичну модель адсорбції неметалевих включень шлаковою фазою, нами було проведено моделювання процесу адсорбції неметалевих включень шлаковою фазою, при цьому вважалося, що адсорбційний процес перебігає у мономолекулярному шарі та

може контролюється дифузією та контролюються константою швидкості хімічного процесу.

В цих дослідженнях було зроблено наступні припущення:

- 1) форма частинок має бути максимально наближеною до сферичної форми;
- 2) процес розчинення відбувається до тих пір, поки частинка повністю не розчиниться;
- 3) у процесі розчинення не відбувається процесу обертання частинки;
- 4) об'єм шлаку залишається сталим.

У дослідженнях для вивчення розчинення частинок неметалевих включень ми застосовували скануючий електронний мікроскоп РЕМ-106И, основними перевагами якого є можливість спостереження процесу розчинення індивідуальної частинки неметалевого включення у шлаку.

У цьому дослідженні у якості включення, що переходить міжфазну границю метал – шлак, використовувався глинозем. При цьому всі твердження, що отримані для частинок глинозема можуть бути застосовані і до інших найпоширеніших включень, а саме Al₂O₃, MgO, ZrO₂ і MgAl₂O₄.

Було прийнято, що розплав сталі являв собою розплав чистого заліза, тому в'язкість металу і переважна частина поверхневих натягів на межі поділу фаз була відома. Початкова швидкість включення була різною в залежності від розміру включень, до максимальна очікувана швидкість течії в металі 0,3 м/с.

Для аналізу було обрано фазу шлаку проміжного ковша. Основні характеристики розплаву металу, шлаку та неметалевих включень наведено у таблиці 1.

Для аналізу результатів експерименту швидкості розчинення неметалевих включень у шлаковій фазі, яка контролюється дифузією, можна представити рівнянням:

$$\tau = \frac{\rho_g \cdot R_g^2 \cdot 3\pi\eta_{ш}}{2kT\Delta C} \quad (13)$$

де k – константа Больцмана; ΔC – зміна концентрації в процесі розчинення неметалевого включення, мас. %.

Одною з основних цілей фізичного моделювання було виявлення умов, коли включення

Таблиця 1

Фізико-хімічні властивості розплаву металу, шлаку та неметалевих включень

	Густина, кг/м ³	В'язкість, Па·с	Поверхневий натяг, Н/м	Склад, масові %			
Включення Al ₂ O ₃	3990	-	$\sigma_{ш-г}$ 0,01-0,2	Al ₂ O ₃ , 100%			
Розплав Fe	7000	0,006	$\sigma_{m-г}$ 1,504	Fe, 100%			
Шлак проміжного ковша	2560	2,308	σ_{m-u} 1,16	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO
				39,5	33	19,5	7,3

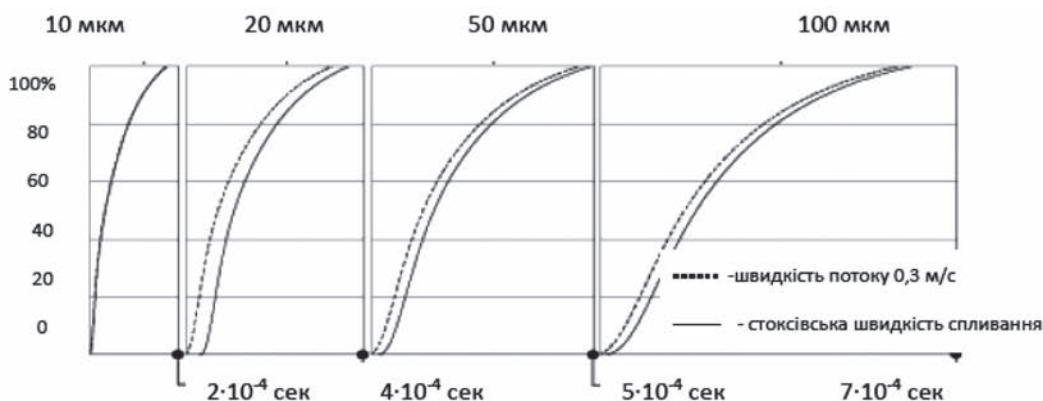


Рис. 1. Нормований розподіл включень різного розміру у шлаці промковша

залишається однією своєю частиною у розплаві металу, а іншою у шлаковій фазі і не асимілюється шлаковою фазою.

Отже метою досліджень було встановлення умов, що призводять до даної ситуації, а також знаходження межі тих властивостей, коли неметалеві включення концентруються на границі поділу метал-шлак, а саме розмір частинок та швидкість їх спливання, значення поверхневого натягу на межі поділу фаз неметалевого включення – шлак, а також в'язкість шлаку.

Дослідження було проведено для чотирьох різних розмірів включень – 10, 20, 50 та 100 мкм. Поверхневий натяг на межі поділу фаз неметалевого включення–шлак було обрано в межах 0,01–0,6 Н/м з припущенням, що при розчиненні включень призводить до зміни складу шлакової фази.

Дані розрахунків свідчать, що при малих значеннях поверхневого натягу на межі поділу фаз неметалевого включення – шлак, рушійною силою процесу адсорбції неметалевих включень буде капілярна сила, що відноситься до розмірів включень, що розглядаються.

Зміна початкової швидкості спливання мало впливає на процес адсорбції неметалевої фази. Як показують розрахунки, початкова швидкість впливає на асиміляцію частинок, розмір яких більше 50 мкм, за рахунок утворення металевої плівки чи шлаків, що мають підвищену в'язкість.

Отже, оскільки рушійною силою процесу відокремлення неметалевих включень від фази металу і перехід їх у шлак є капілярна сила. Для проміж-

ного ковша поверхневий натяг на межі поділу неметалевого включення – шлак повинен бути не більше 0,4 Н/м, що сприяє видаленню 90–95% неметалевих включень з радіусом від 10 до 100 мкм, з початковою швидкістю спливання – 0,3 м/с.

Слід зауважити, що при розчиненні у шлаку частинки неметалевих включень змінюють свою форму. Оскільки процес розчинення має тенденцію до зменшення площі включень, що контактують зі шлаком, то розчинення буде мати тенденцію до зменшення поверхневого натягу на межі поділу фаз шлак – неметалевого включення, тому частинка буде рухатися в шлак під час розчинення.

Дані розрахунків свідчать, що час адсорбції неметалевих включень лежить в межах від $2 \cdot 10^{-4}$ до $7 \cdot 10^{-4}$ сек, в залежності від розміру включення. Зростання часу адсорбції неметалевих включень великих розмірів спостерігається за рахунок більш тривалого відокремлення металевих плівок від поверхні неметалевого включення.

Результати розрахунків з використанням рівняння (13) наведені на рис. 1.

Висновки і пропозиції. У результаті проведених досліджень встановлено механізм адсорбції неметалевих включень, визначено умови які краще впливають на процес адсорбції неметалевих включень шлаковою фазою, а також встановлено час асиміляції шлаком включень різного розміру.

Наступним етапом наших досліджень буде вивчення впливу природи неметалевих включень на їх асиміляцію шлаковою фазою.

Список літератури:

1. Zhao S., Zushu L., Renze X., Darbaz K., Gaoyang S. Dissolution Behavior of Different Inclusions in High Al Steel Reacted with Refining Slags. 2021. – Metals. – Vol. 11. – p. 56–71.
2. Xu, J.F., Wang K.P., Wang Y., Qu Z.D., Tu X.K. Effects of ferrosilicon alloy, Si content of steel, and slag basicity on compositions of inclusions during ladle furnace refining of Al-killed steel. 2020. – J. Iron Steel Res. Int. – Vol. 27. – p. 1011–1017.

3. Wang, G.C., Zhao, Y., Xiao Y.Y., Jin, P.L., Li S.L., Sridhar, S. Diversified aggregated patterns of alumina inclusions in high-Al iron melt. 2020. – Met. Mater. Trans. – Vol. 51. – p. 3051–3066.
4. Yang, J., Chen D.F., Zhu M.Y., Crystallization and heat transfer of CaO–SiO₂-based slag for high-Mn–high-Al steel. 2020. – J. Iron Steel Res. Int. – Vol. 27. – p. 788–795.
5. Chen G.J., He, S.P., Wang Q. Dissolution behavior of Al₂O₃ into tundish slag for high-Al steel. 2020. – J. Mater. Res. Technol. – Vol. 9. P. 11311–11318.
6. Dewangan S., Behera S., Chowrasia M.K. Comparative analysis into mechanical properties and microstructural attributes of quenched and tempered 0.2%-C steel. 2020. – World J. Eng. – Vol. – p. 17, 127–133.

Yefimova V.G., Smirnov U.A., Pilipenko T.M. REMOVAL OF NON-METALLIC INCLUDES FROM MELTED STEEL IN THE TUNDISH DUE TO THEIR ABSORPTION BY THE SLAG PHASE

This study shows that the formation of non-metallic inclusions in the steelmaking process is inevitable and if their quantity is not controlled, problems related to productivity and production can arise.

It has been proven that slag is one of the available resources for controlling non-metallic inclusions in molten steel. At the same time, the work shows that distribution and adsorption can determine the ability of slag to absorb non-metallic inclusions.

As a result of the conducted research, the conditions were established when non-metallic inclusions remain at the boundary of the phase separation between molten steel and slag in the tundish during continuous overflow of steel.

It is shown in the paper that the delay of the non-metallic phase at the boundary between the steel melt and the slag can lead to the entrapment of non-metallic inclusion particles in the depth of the melt.

Research has established the main parameters that affect the process of adsorption of non-metallic inclusions by the slag phase, namely, the size of the particles, the speed of their floating, the surface tension at the metal-slag phase separation boundary, as well as the viscosity of the slag.

It is shown that the rate of capture of solid particles of oxide inclusions from molten steel by molten slag depends on the rate of flow of the metal film from their surface (which occurs at certain particle velocities), the amount of surface tension at the interface between the molten steel and slag phases, and the rate of their dissolution in the slag phase.

With the use of mathematical calculations, the probability of the process of adsorption of oxide inclusions with a size of 10 to 100 μm with a floating speed from Stokes to 0.3 m/s to the border of the phase separation between molten steel and slag phase is shown.

Calculations showed that the destruction and flow of metal films from the surface of non-metallic inclusions occurs quite quickly and therefore they can be neglected.

Physical modeling showed that the process of separation of non-metallic inclusions from the metal surface, and then the transition to the slag phase, depends on the value of the surface energy at the boundary of the non-metallic inclusion – slag phase separation. It is shown that the minimum value of the surface tension for the separation of the non-metallic phase should be 0.41 N/m.

With the use of a scanning laser microscope, a study of the final stage of removal of non-metallic inclusions by the slag phase was carried out, namely the process of adsorption of the non-metallic phase and the slag phase.

Research data show that there is a correlation between slag viscosity and its supersaturation with respect to non-metallic inclusions.

The dissolution time of non-metallic inclusions in the slag phase was determined depending on their size.

Key words: intermediate ladle, non-metallic inclusions, adsorption, Gibbs energy, steel melt.

Єфімова В.Г.

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

Смірнов Ю.О.

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України

Пилипенко Т.М.

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНОГО МЕХАНІЗМУ РОЗЧИНЕННЯ ЧАСТИНОК НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ У РАФІНУВАЛЬНОМУ ШЛАКУ ПРОМІЖНОГО КОВША

У цьому дослідженні показано, що важливе значення набуває вміст неметалевих включень на останньому етапі виробництва сталі у проміжному ковші. Доведено, що утворення неметалевих включень відбувається на всіх етапах розливання сталі у проміжному ковші.

Визначено, що одним з найкращих методів видалення неметалевих включень є розчинення їх у шлаковій фазі.

У даній роботі встановлено фізико-хімічний механізм розчинення частинок Al_2O_3 у рафінувальному шлаку проміжного ковша, який складається з трьох стадій, а саме транспортування неметалевих включень до межі поділу розплав сталі шлак, відокремлення неметалевого включення від розплаву сталі та подолання поверхневого натягу шлакової фази та розчинення у ній.

В роботі доведено, що найменш вивченою стадією є друга стадія.

З використанням термодинамічних залежностей визначено, що відокремлення неметалевих включень від межі поділу фаз розплав сталі – шлак супроводжується зниженням вільної енергії системи.

Встановлено, що розчинення неметалевих включень у шлаковій фазі відбувається у дифузійній області і контролюється законами дифузії.

Для вивчення механізму розчинення неметалевих включень у шлаковій фазі у роботі було проведено експерименти по розчиненню частинок Al_2O_3 у шлаку промислового складу в діапазоні температур 1500–1600°C.

В дослідженнях показано, що висока в'язкість шлаку обмежує дифузійну частинку Al_2O_3 особливо при високих температурах. Доведено, що утворення зони розчинення навколо частинки неметалевого включення в умовах природної конвекції обмежує швидкість розчинення.

Встановлено, що утворення продуктів реакції розчинення Al_2O_3 таких як $CaAl_4O_7$ (CA_2) і $CaAl_2O_4$ (CA) є непрямим процесом розчинення, а відбувається на межі поділу фаз Al_2O_3 – шлак.

Показано, що цей процес має незначний вплив на загальну швидкість розчинення неметалевих включень у шлаку. Встановлено, що наявність значного градієнта Al_2O_3 у шлаку поблизу межі поділу вказує на те, що транспортування частинок у шлаку контролює загальну швидкість розчинення.

У роботі представлено механізм гетерогенного процесу розчинення твердих включень у рафінувальному шлаку проміжного ковша за рахунок дифузійних процесів. Доведено, що продукти реакції розчинення неметалевих включень утворюють суцільний шар на поверхні частинок. Показано, що кінетика розчинення залежить від швидкості дифузії у зоні розчинення.

Ключові слова: проміжний ковш, неметалеві включення, рафінувальний шлак, кінетика гетерогенних процесів, дифузія.

Постановка проблеми. При виробництві чистої сталі у проміжному ковші важливе значення набуває вміст неметалевих включень у готовому продукту. Надмірна кількість включень може призвести до зниження якості сталевих

заготовки. Включення утворюються в результаті окислення сталі при технологічних переливах, а також руйнуванні вогнетривких матеріалів та емульгуванні шлаку. Одним з найперспективнішим методом видалення неметалевих включень

з розплаву сталі у проміжному ковші є абсорбція її шлаковою фазою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Основна увага наукових досліджень, що вивчають процеси рафінування сталі від неметалевих включень присвячена вивченню гідродинамічних процесів, що відбуваються у ванні проміжного ковша із застосуванням фільтраційних перегородок та продувальних пристроїв різноманітної конструкції [1-3]. При цьому розглядається механізм доставки частинок неметалевих включень до шлакової поверхні з утворенням мономолекулярного шару на межі поділу фаз розплав сталі – шлак [4, 5]. Разом з тим, відсутні дані стосовно механізму переходу частинок неметалевої фази границі поділу фаз метал-шлак, а також процесу адсорбції неметалевих включень шлаковою фазою. В дослідженнях [6] наведені деякі аспекти цього механізму адсорбції, але вони не наводять фізико-хімічний механізм цього процесу.

Метою даного дослідження було встановлення фізико-хімічного механізму розчинення частинок Al_2O_3 у шлаковій фазі визначеного складу.

Реалізація поставленої мети здійснювалась шляхом вирішення наступних завдань:

– аналізу термодинамічної вірогідності видалення частинок неметалевої фази з розплаву металу;

– проведення експериментальних досліджень розчинення частинок Al_2O_3 у шлаку визначеного хімічного складу;

– проведення металографічних досліджень; - формулювання механізму розчинення неметалевих включень у шлаковій фазі.

Виклад основного матеріалу. Видалення неметалевих включень шлаковою фазою відбувається у три стадії:

1) Транспортування неметалевих включень до межі поділу розплав сталі – шлак;

2) Відокремлення неметалевого включення від розплаву сталі;

3) Подолання поверхневого натягу шлакової фази та розчинення у ній.

Включення можна вважати видаленим зі сталі лише тоді, коли воно повністю розчинене в шлаку. Якщо цього не станеться, включення зможе повернутися до сталевій ванні в залежності від режиму потоку сталі у проміжному ковші.

Найменш вивченою стадією видалення неметалевих включень вважається друга стадія, що передбачає подолання границі поділу фаз розплав сталі – шлак. На цей процес значний вплив

чинять сили поверхневої енергії на межі поділу фаз метал – шлак.

Термодинамічна ймовірність переходу неметалевим включенням границі поділу фаз розплав сталі – шлакова фаза буде зменшення вільної енергії системи:

$$\Delta G = \sigma_{\text{включення-шлак}} - \sigma_{\text{включення-сталь}} - \sigma_{\text{сталь-шлак}} \quad (1)$$

де $\sigma_{\text{включення-шлак}}$ – поверхневий натяг на межі поділу фаз неметалеве включення – шлак, H/m^2 ; $\sigma_{\text{включення-сталь}}$ – поверхневий натяг на межі поділу фаз неметалеве включення – розплав сталі, H/m^2 ; $\sigma_{\text{сталь-шлак}}$ – поверхневий натяг на межі поділу розплав сталі – шлак, H/m^2 .

Відокремлення неметалевих включень від межі поділу фаз розплав сталі – шлак супроводжується зниженням вільної енергії системи.

Час відокремлення включення від розплаву сталі буде залежати від агрегатного стану включення. Тверді включення мають велике значення крайового кута змочування межі поділу фаз включення – розплав сталі. Таким чином, при наближенні до поверхні поділу фаз розплав сталі – шлак значна рушійна сила дозволяє цим включенням відокремитися від сталі та запобігає повторному захопленню.

Швидкість розчинення частинок неметалевих у шлаковій фазі можна представити рівнянням:

$$-\frac{dr}{dt} = k \left(\frac{\rho_{\text{шлак}}}{100 \cdot \rho_{\text{e}}} \right) [\text{мас\%вк}(ст - ш) - \text{мас\%вк}(ш)] \quad (1)$$

де $\rho_{\text{шлак}}$ – густина шлаку, $кг/м^3$; ρ_{e} – густина включення, $кг/м^3$; $\text{мас\%вк}(ст - ш)$ – масовий відсоток включень, що перебувають на межі поділу фаз розплав сталі – шлак; $\text{мас\%вк}(ш)$ – масовий відсоток включень у шлаковій фазі.

Процес розчинення неметалевих включень у шлаковій фазі відбувається у дифузійній області і контролюється законами дифузії. Отже час розчинення частинки неметалевого включення у шлаковій фазі можна представити як:

$$\tau = \frac{\rho_{\text{e}} \cdot R_0}{D [C_c - C_{\text{ш}}]} \quad (2)$$

де R_0 – початковий радіус неметалевих включень, м; ρ_{e} – густина неметалевого включення, $кг/м^3$; D – коефіцієнт дифузії, $м^2/с$; C_c – концентрація включень у розплаві сталі, %; $C_{\text{ш}}$ – концентрація включень у шлаковій фазі, %.

Отже для вивчення механізму розчинення неметалевих включень у шлаковій фазі нами були проведені експерименти по розчиненню частинок Al_2O_3 у шлаку промислового складу, який наведено у таблиці 1.

Таблиця 1
Хімічний склад промислового шлаку у % (мас)

Речовина	CaO	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	MnO	основність
%	42-55	14-20	5-10	0-3	9-15	0-5	0-8	3,5 – 5,0

Дослідження проводили у вертикальній печі, рис. 1, що дозволяла додавати частинки Al₂O₃ до шлаку при високій температурі. У молібденовий тигель з внутрішнім діаметром 40 мм та товщиною 5 мм додавали наближено 50-70 грамів порошкоподібного шлаку і нагрівали в печі. Піч нагрівали зі швидкістю 5 °С/хв. Після досягнення бажаної температури (таблиця 2) до однорідного шлаку додавали кульки Al₂O₃ (кількість близько 5 мас.% шлаку). Тигель виймали з печі після заданого часу витримки та гартували водою. Загартований шлак висвердлювали з тигля для подальшого аналізу.

Таблиця 2
Опис умов експерименту

№ експерименту	t, °C	Час додавання частинок Al ₂ O ₃ , s
1	1600	60, 120, 180
2	1580	
3	1550	
4	1500	180, 300

Шлак, який було висвердлено поміщали у смолу з низькою в'язкістю, шліфували шліфувальним папером із карбіду кремнію та полірували алмазною суспензією. Поліровані зразки були покриті вуглецем для композиційного та мікроструктурного аналізу. Композиційний аналіз проводили за допомогою повного кількісного рентгенівського мікроаналізу з електронним зондом у поєднанні з дисперсійною спектроскопією.

Кількісний аналіз ліній проводився в кількох напрямках навколо розчинної частинки, а потім

вимірювання були згруповані в один набір даних для подальшого розгляду. Для кожного зразка для кількісного аналізу була обрана частинка з найбільшим діаметром у поперечному перерізі, припускаючи, що поперечний переріз є найближчим до площини, що проходить через центр частинки.

Усі виміряні точки на фазі шлаку в межах 50 мкм від поверхні розділу частинка/шлак були виміряні як сукупність трьох точок (відокремлених 2 мкм одна від одної). На відстані більше 50 мкм від межі розділу використовувався електронний промінь діаметром 2 мкм. Це було кращим замість точки, оскільки шлак розділявся на кілька фаз після охолодження, а метою було виміряти загальний вміст Al₂O₃.

У якості продуктів реакції в усіх зразках на межі поділу фаз Al₂O₃ – шлак утворюється Al₂O₃–CaO. При цьому морфологія та тип продуктів реакції залежать від температури. Суцільний шар CaAl₄O₇ оточує частково розчинену частинку при 1600 °C (рис. 1), тоді як при 1500 °C CaAl₂O₄ є основною складовою міжфазного шару (рис. 2(б)). У зв'язку з розділенням фаз під час охолодження важливо розрізняти фази, що виділяються в шлаку при високій температурі, і ті, що з'являються під час затвердіння.

Було проаналізовано зразки з експериментів, проведених при чотирьох різних температурах (табл. 2). Представлені результати отримані в результаті експериментів, проведених при 1600 і 1500°C, оскільки вони дають повну картину процесу розчинення та підкреслюють вплив різних параметрів на процес. У всіх випадках зона, багата Al₂O₃, утворюється поблизу частинок (рис. 3, 4) і містить виділені кристалічні фази. Розмір цієї зони та фаз у ній збільшується зі збільшенням часу та температури. Довга вісь подовжених кристалічних фаз має той самий напрямок, що й потік

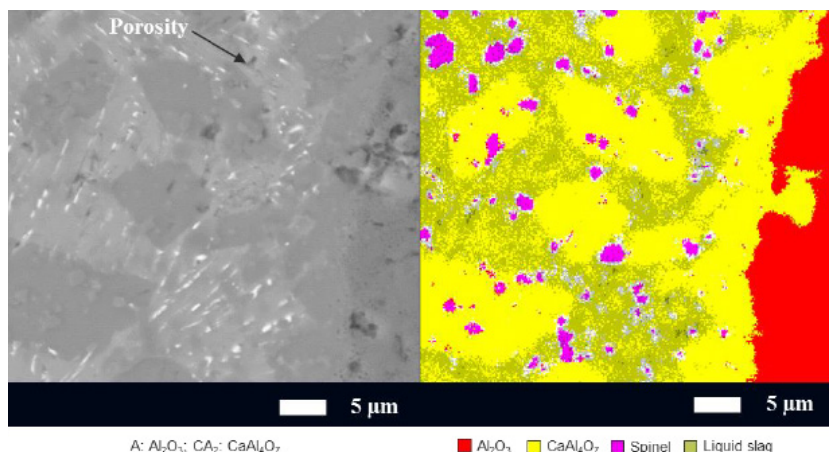


Рис. 1. Електронне зображення межі поділу фаз Al₂O₃ – шлак за 1600°C для зразка через 60 с після занурення у шлакову фазу

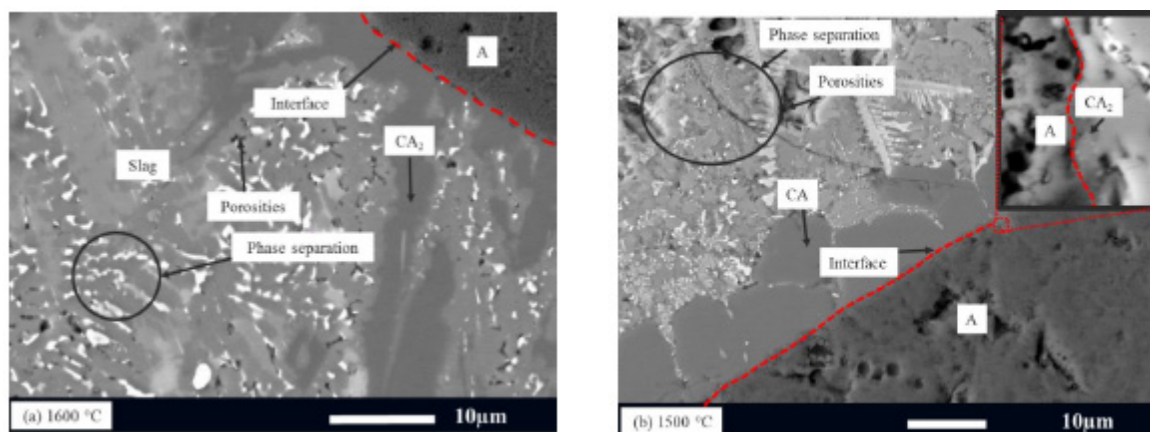


Рис. 2. Продукти реакції, що утворилися на межі поділу фаз частинки Al_2O_3 – шлак (а) при 1600°C (б) при 1500°C . Границя поділу фаз показана червоною лінією

частинок у розплавленому шлаку, тобто перпендикулярно поверхні розділу частинок, що розчиняються.

Для подальшого з'ясування механізму розчинення неметалевих включень шлаковою фазою нами було розроблено модель, яка заснована на експериментальних спостереженнях. Ця модель враховує термодинамічну рівновагу та закономірність перебігу гетерогенних процесів. Згідно цієї теорії можна висунути наступні етапи:

1. Початкове локальне падіння температури від додавання частинок (за кімнатної температури) до розплавленого шлаку ми нехтували. Зниження температури може мати значний вплив на початкову швидкість розчинення, але враховуючи невелику кількість зразка шлаку та постійне підведення тепла, вплив цього початкового падіння тепла є незначним.

2. Швидкість утворення продуктів реакції висока. Це означає, що локальна рівновага досягається миттєво.

3. Перенесення іонів Al^{3+} і Ca^{2+} в розплавленому шлаку можна розглядати як транспортування Al_2O_3 і CaO .

4. На межі розділу фаз частинок неметалевих включень Al_2O_3 -шлак утворюються продукти реакції через розчинення Al_2O_3 у рідині та наступною реакцією з CaO .

5. Частинки мають сферичну форму (протягом усього процесу) з деякими нерівностями на поверхні.

6. Кожна частинка розчиняється самостійно. Отже, взаємодією відповідної частинки з іншими розчиненими частинками ми нехтували.

Після додавання частинок Al_2O_3 вони безпосередньо розчинялись у розплавленому шлаку, утворюючи фазу CA (CaAl_2O_4). Коли досягалося

насичення продуктами розчинення частинок глинозема вони поєднувались з CaO в шлаку та розчиненням Al_2O_3 з утворенням нової фази (CA_2) (CaAl_4O_7) на межі розділу частинок. Утворення нової фази CA_2 супроводжується поглинанням CaO , що призводить до надходження CaO до поверхні розділу. Зародження CA_2 і ріст цих ядер на межі поділу фаз призводить до утворення нової фази, яка вкрита суцільним шаром CA_2 . Тривале розчинення Al_2O_3 та транспортування частинок призводить до розширення зони, що збагачена Al_2O_3 , далі від межі поділу фаз. Це сприяє виділенню фази CA_2 не тільки на межі поділу, але й далі від неї. Проте ріст реакційного шару, який було утворено обмежений. Це зростання залежить від кількості Al_2O_3 через реакційний шар до рідини та припливу CaO до границі поділу фаз CA_2 -шлак. Фази CA_2 , що виникли далеко від межі розділу, продовжують рости за рахунок шару. Зростання цих виділених фаз відбувається приблизно перпендикулярно межі розділу вздовж напрямку надходження CaO з маси шлаку (рис. 2).

Обидві фази CA_2 і CA є термодинамічно стабільними при 1500°C . Швидкість розчинення, однак, знижується при зниженні температури, що зменшує приплив Al_2O_3 до шлаку. Початкове осадження невеликої кількості CA_2 , зменшує як розчинений Al_2O_3 , так і локальний вміст CaO у шлаку. Це зміщує склад шлаку в області стабільності CA , що призводить до переважного утворення CA .

Таким чином, незважаючи на те, що розчинення Al_2O_3 у шлаку проміжного ковша є непрямим процесом розчинення, воно має незначний вплив на загальну швидкість розчинення через відносно обмежену товщину міжфазного реакційного шару. Наявність значного градієнта Al_2O_3 у шлаку поблизу межі поділу та утворення

осадів вказує на те, що транспортування частинок у шлаку контролює загальну швидкість розчинення.

Висновки і пропозиції. У роботі було досліджено розчинення частинок Al_2O_3 у розплавленому шлаку проміжного ковша в діапазоні температур 1500–1600 °С. Показано, що утворення зони розчинення навколо частинки неметалевого включення, що розчиняється, в умовах природної конвекції обмежує швидкість розчинення. Це пов'язано з високою в'язкістю шлаку, який обмежує дифузію Al_2O_3 , особливо при низьких температурах.

Було виявлено, що розчинення частинок у шлаку є непрямим процесом розчинення, при якому кристалічні продукти реакції Al_2O_3 –CaO, такі як $CaAl_4O_7$ (CA2) і $CaAl_2O_4$ (CA), утворюються на поверхні частинок, тобто на межі поділу фаз Al_2O_3 – шлак. На межі розділу формувалася

суцільний шар цих продуктів. Експериментальні дані використовували для оцінки шляхів розчинення. Було виявлено, що поблизу межі поділу Al_2O_3 –шлак взаємна дифузія Al_2O_3 і CaO є домінуючим явищем. Шлях розчинення зміщується в бік подвійної системи Al_2O_3 –CaO, коли ми рухаємося від основного шлаку до поверхні розділу.

В результаті проведених досліджень було представлено механізм, де закономірності кінетики гетерогенних процесів пояснює процес розчинення неметалевих включень у шлаковій фазі з утворенням продуктів реакції. Показано, що продукти реакції утворюють суцільний шар на поверхні частинок, що розчинялися, але їх товщина залишалася обмеженою і, отже, не мала істотного впливу на загальний процес розчинення. Встановлено, що швидкість процесу розчинення залежить від дифузії частинок у шлаку, особливо в зоні розчинення.

Список літератури:

1. Hyun Park J., Zhang L. Kinetic modeling of nonmetallic inclusions behavior in molten steel: A Review. 2020. – Metallurgical and materials transactions B. – Vol. 51. – p. 2453–2482.
2. Valdez M., Shannon S., Sridhar R. The ability of slags to absorb solid oxide inclusions. 2016. – ISIJ International, Vol. 46 No. 3. – p. 450–457.
3. Li J.Y., Cheng G.G., Ruan Q., Pan J.X., Chen X.R. Evolution behaviour of nonmetallic inclusions in Ti-bearing 11Cr stainless steel with calcium treatment. 2020. -Ironmak Steelmak. – Vol. 47 (1). – p. 31–39.
4. Nishimoto M., Muto I., Sugawara Y. Review-understanding and controlling the electrochemical properties of sulfide inclusions for improving the pitting corrosion resistance of stainless steels. – 2023. – Mater Trans. – Vol. 50 (5). – p. 712–720.
5. Li S., Hu J.Z., Zhang J., Ren Y., Zhang L.F. Pitting corrosion initiated by Al_2O_3 –CaO–CaS inclusions in a 304 stainless steel. 2023. – Metall Mater Trans B. – Vol. 54 (2). – p. 1784–1797.
6. Park J.S., Park J.H. Effect of slag composition on the concentration of Al_2O_3 in the inclusions in Si-Mn-killed steel. 2014. – Metall Mater Trans B. – Vol. 45 (3). – p. 953–960.

Yefimova V.G., Smirnov U.A., Pilipenko T.M. STUDY OF THE PHYSICO-CHEMICAL MECHANISM OF DISSOLUTION OF PARTICLES OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN THE REFINING SLAG OF THE INTERMEDIATE BUCKET

This study shows that the content of non-metallic inclusions at the last stage of steel production in the intermediate ladle becomes important. It has been proven that the formation of non-metallic inclusions occurs at all stages of pouring steel in the intermediate ladle.

It was determined that one of the best methods of removing non-metallic inclusions is their dissolution in the slag phase.

In this work, the physico-chemical mechanism of dissolution of Al_2O_3 particles in the refining slag of the intermediate ladle is established, which consists of three stages, namely, the transportation of non-metallic inclusions to the separation boundary of the molten steel slag, the separation of the non-metallic inclusion from the molten steel and overcoming the surface tension of the slag phase and dissolution in her

The paper proves that the least studied stage is the second stage.

With the use of thermodynamic dependences, it was determined that the separation of non-metallic inclusions from the phase separation boundary between molten steel and slag is accompanied by a decrease in the free energy of the system.

It was established that the dissolution of non-metallic inclusions in the slag phase occurs in the diffusion region and is controlled by the laws of diffusion.

In order to study the mechanism of dissolution of non-metallic inclusions in the slag phase, experiments were conducted on the dissolution of Al_2O_3 particles in slag of industrial composition in the temperature range of 1500–1600°C.

Studies have shown that the high viscosity of slag limits the diffusion of Al_2O_3 particles, especially at high temperatures. It has been proven that the formation of a dissolution zone around a non-metallic inclusion particle under natural convection limits the dissolution rate.

It was established that the formation of Al_2O_3 dissolution reaction products such as $CaAl_4O_7$ (CA2) and $CaAl_2O_4$ (CA) is an indirect dissolution process, and occurs at the boundary of the Al_2O_3 –slag phase separation.

It is shown that this process has a minor effect on the overall rate of dissolution of non-metallic inclusions in the slag. The presence of a significant Al_2O_3 gradient in the slag near the separation boundary is found to indicate that particle transport in the slag controls the overall dissolution rate.

The work presents the mechanism of the heterogeneous process of dissolution of solid inclusions in the refining slag of the intermediate ladle due to diffusion processes. It has been proven that the products of the dissolution reaction of non-metallic inclusions form a continuous layer on the surface of the particles. It is shown that the dissolution kinetics depends on the diffusion rate in the dissolution zone.

Key words: *intermediate ladle, non-metallic inclusions, refining slag, kinetics of heterogeneous processes, diffusion.*

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 620.3: 66.061.34 + 543.9

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/14>

Воробйова В.І.

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

Андрух Ю.М.

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

Морозова Д.О.

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

Земцова В.В.

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

Васильєв Г.С.

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

Скиба М.І.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Скиба Ю.М.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

ДОБІР СКЛАДОВИХ ДЛЯ СИНТЕЗУ ЕКОЛОГІЧНИХ ІОННИХ РІДИН НОВОГО ПОКОЛІННЯ НА ОСНОВІ КВАНТОВО-ХІМІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ

У статті визначено індекси реакційної здатності при формуванні низькотемпературних евтектичних розчинників на основі квантово-хімічно визначених енергетичних та структурних параметрів молекул переліку сполук: молочна кислота, сечовина, бетаїн, холін хлорид, ксилітол, пролін. Теорію функціонала густини та визначення електронної структури методом Хартрі-Фока використано для інтерпретації і обґрунтування квантово-хімічних методів розрахунків. Проаналізовано енергетичні параметри досліджуваних сполук, а саме значення енергії вищої зайнятої молекулярної орбіталі ($E_{\text{ВЗМО}}$). Встановлено, що донорна здатність сполук зменшується у напрямку Ксилітол (9.4573 eV) < Пролін (-9.6873) < Холін хлорид (-9.8745 eV) < Бетаїн (-10.0103eV) < Сечовина (-10.5173eV) < Молочна кислота (-11.4279 eV). За аналізом індексу електрофільності акцепторна здатність сполук при формуванні НЕР наступна: Молочна кислота < Пролін < Холін хлорид < Ксилітол < Бетаїн < Сечовина. Найнижчі значення величини енергії цілини молекулярних орбіталей (ΔE) у холін хлориду (10.123eV), ксилітолу (9.733 eV) та проліну (10.65 eV). Досліджено шість НЕР: НЕР-1 Бетаїн-Сечовина; НЕР-2 Холін Хлорид-Сечовина; НЕР-3 Бетаїн -Молочна кислота; НЕР 4 Пролін -Ксилітол; НЕР-5 Холін Хлорид-Пролін; НЕР-6 Холін хлорид-Ксилітол. Порядок збільшення електронегативності для НЕР наступний: $-3,99 > -4,24 > -4,60 > -4,71 > -5,24 > -5,38 = \text{НЕР-1} > \text{НЕР-4} > \text{НЕР-6} > \text{НЕР-5} > \text{НЕР-3} > \text{НЕР-2}$. Найвищий індекс електрофільності у НЕР-2 холін хлорид сечовина (1,34 eV) та НЕР-3 бетаїн-молочна кислота (1.311 eV). Серед розчинників, НЕР-5 (Холін Хлорид-Пролін) та НЕР-6 (Холін хлорид-Ксилітол) є найкращим розчинником із найменшою енергетичною щільною (9,93 та 9,70 eV), найвищим хімічним потенціалом, хімічною м'якістю (0,20 eV) і помірним індексом електрофільності (1.179 та 1.151eV) і відносно меншою електронегативністю (-0,19 eV).

Ключові слова: «зелені» розчинники, низькотемпературні евтектичні розчинники, квантово-хімічні розрахунки, індекси реакційної здатності, електронегативність, індексу електрофільності, хімічна твердість, м'якість.

Постановка проблеми. Низькотемпературні евтектичні розчинники (НЕР) – рідини, що складаються з двох/трьох компонентів, здатних формувати евтектичну суміш з точкою плавлення значно нижче, ніж у кожного окремого компонента [1–3]. Ці розчинники були широко визнані екологічно чистими заміниками органічних розчинників для різних галузей, таких як електрохімія [2], каталіз [3] екстракція природних органічних сполук [4], синтез наноматеріалів [5]. Основними перевагами НЕР є низька вартість, простота синтезу, низька токсичність, біосумісність і біорозкладність. При формуванні НЕР одна сполука виступає як донор, а інша як акцептор для формування водневого зв'язку [4]. Ефективність утворення НЕР сполуками-донорами залежить від її просторової (молекулярної та електронної) структури, відповідно від певних індексів реакційної здатності (ІРЗ). Експериментальний підбір складових для синтезу НЕР є довгим та економічно не вигідним. Використовуючи теоретичні квантово-хімічні розрахунки можна спрогнозувати реакційну здатність/спроможність сполук до утворення зв'язку та вірогідні точки (центри) міжмолекулярної взаємодії як в межах представників сполук одного гомологічного ряду, так і в рамках різних класів органічних сполук [5]. Тому, на думку багатьох дослідників [6–7], першочерговим при створенні нових НЕР є визначення реакційної здатності сполук при утворенні НЕР, які можна спрогнозувати, виходячи з оцінки реакційної здатності органічних молекул, отриманих в результаті квантово-хімічних розрахунків електронної та енергетичної характеристики молекул. Доцільно попередньо перед синтезом нових НЕР, оцінити та обрати більш реакційно здатні сполуки, що можуть виступати як сполуками-донорами при формуванні НЕР. До того ж, напівемпіричні методи, засновані на теорії функціонала густини, також в останній час все більше залучається при створенні нових НЕР [8]. А саме розглядають енергетичні параметри $E_{\text{ВЗМО}}$ сполуки донора, та $E_{\text{НВМО}}$ акцептора для прогнозування ефективності формування НЕР. Використовуючи комп'ютерне моделювання за допомогою програмного забезпечення COSMO-RS, що є інструментом для прогнозування полярності та центів для взаємодії можна спрогнозувати реакційні центри при формуванні НЕР.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Квантово-хімічні методи розрахунків (КХР) в органічній хімії сприяють розробці теоретичних передумов підбору і цілеспрямованого синтезу новітніх НЕР. Використовуючи обчислювальні методи квантової хімії, в ряді публікацій пред-

ставлено інформацію електронної будови молекул, що виступають як донори водневого зв'язку [9–11]. Вивчені системи холіну хлорид – карбоксильні кислоти/поліолі. В той же час, системи на основі батаїну, ксилітолу, проліну є не вивченими.

Мета роботи – на основі квантово-хімічних розрахунків провести добір складових для синтезу екологічних іонних рідин нового покоління для подальшого їх використання у хімічній технології. Визначити квантово-хімічних характеристик складових та евтектичної системи на основі параметрів енергії ВЗМО ($E_{\text{ВЗМО}}$) та НВМО ($E_{\text{НВМО}}$), електро-негативності (χ), індексу електрофільності (ω), хімічної жорсткості (η) та м'якості (S). Визначення σ -профілю для компонентів НЕР стане теоретичною основою для подальшого вивчення розчинності відносно інших органічних сполук.

Виклад основного матеріалу. Методика експериментальних досліджень

Прогнозна оцінка реакційної здатності ряду органічних сполук була проведена в програмному середовищі HyperChem. Оптимізація виконана за допомогою напівемпіричного методу з розширеним методом РМЗ. Для цього використовувалися силові поля, такі як ММ+ (засновані на ММ2). Реакційну здатність сполук оцінювали по електронним характеристикам досліджуваних структур: енергії ВЗМО ($E_{\text{ВЗМО}}$) та НВМО ($E_{\text{НВМО}}$) та розрахованих на їх основі індексів реакційної здатності. Основний зв'язок розрахованої енергії молекули методом функціоналу густини та її хімічної реактивності представлено у праці [11], який пов'язує хімічний потенціал (μ) із першою похідною енергії по відношенню числа електронів, а отже і з електронегативністю (χ) взятую із протилежним знаком [13]:

$$\mu = -\chi = \left(\frac{\partial E}{\partial N} \right)_{v(r)} \quad (1)$$

Далі використовували концепцію хімічної жорсткості, яку визначають другою похідною енергії по відношенню до електронів, тобто [14–15]:

$$\eta = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 E}{\partial N^2} \right)_{v(r)} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \mu}{\partial N} \right)_{v(r)} \quad (2)$$

Відповідно до концепції Пірсона і Парра [13], слід вказати, що, припускаючи квадратичну залежність між енергією та числом електронів рівняння можна [1] записати у вигляді:

$$\chi = -\mu = \left(\frac{I + A}{2} \right) \quad (3)$$

$$\eta = \left(\frac{I - A}{2} \right) \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{1}{\eta} \quad (5)$$

Тоді в термінах теорії молекулярних орбіталей представлені наближені визначення з використанням поняття спорідненості до електрону (A) і енергії іонізації (I). Відповідно для будь-якого хімічного виду взаємодії (атом, іон або молекула) електронегативність (χ) та жорсткість (η), розраховуються відповідно до виразів:

$$\eta = \frac{E_{ВЗМО} - E_{НВМО}}{2} \text{ та } \chi = \frac{E_{ВЗМО} + E_{НВМО}}{2} \quad (6)$$

Електрофільність можна записати через потенціал іонізації та спорідненість до електрона. Нуклеофільність (ε) є фізично зворотною величиною електрофільності ($1/\omega$).

$$\omega = \frac{\mu^2}{2\eta} = \frac{\chi^2}{2\eta} \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{\omega} \quad (8)$$

Параметри, які були визначені вище, є найбільш важливими параметрами, розглянутими в наукових дослідженнях [13–45] при доборі складових для синтезу екологічних іонних рідин нового покоління.

Отримані експериментальні результати.

У таблиці 1 представлені складові для формування НЕР. Розраховано індекси реакційної здатності (табл. 2, 3) окремих складових та σ -профіль (табл. 3) сполук.

Значення енергії ВЗМО ($E_{ВЗМО}$) часто пов'язують зі здатністю молекули віддавати електрон (тобто $E_{ВЗМО}$ виступає в якості донора електронів), в той час як $E_{НВМО}$ вказує на здатність молекули приймати електрон. Тобто сполуки із більшим значенням цього параметра мають більшу здатність до утворення НЕР.

Таблиця 2

Енергетичні параметри молекул

Сполуки	$E_{ВЗМО}$ (eV)	$E_{НВМО}$ (eV)	$\Delta E = \text{НОМО} - \text{ЛУМО}$
Молочна кислота	-11.4279	0.6233	12.05
Сечовина	-10.5173	2.0243	12.54
Бетаїн	-10.0103	0.93854	12.55
Холін хлорид	-9.8745	0.2489	10.123
Ксилітол	-9.4573	0.2765	9.733
Пролін	-9.6873	-0.9687	10.65

Зі збільшенням значення $E_{ВЗМО}$ досліджуваних сполук їх реакційна ефективність зростає: Ксилітол (9.4573 eV) < Пролін (-9.6873) < Холін хлорид (-9.8745 eV) < Бетаїн (-10.0103eV) < Сечовина (-10.5173eV) < Молочна кислота (-11.4279 eV). Із досліджуваних сполук найкращими донорами є холін хлорид, ксилітол та пролін. Зі зменшенням величини енергії щільності молекулярних орбіталей (ΔE) досліджуваних сполук їх донорна ефектив-

Таблиця 1

Системи НЕР

Скорочення	Акцептор водневого зв'язку	Структурна формула	Донор водневого зв'язку	Структурна формула	Співвідношення сполук
НЕР-1	Бетаїн		Сечовина		1:2
НЕР-2	Холін Хлорид		Сечовина		1:2
НЕР-3	Бетаїн		Молочна кислота		1:2
НЕР-4	Пролін		Ксилітол		5:1
НЕР-5	Холін Хлорид		Пролін		1:1
НЕР-6	Холін хлорид		Ксилітол		5:2

Індекси реакційної здатності молекул

Сполуки	Потенціал іонізації	Ядерної подібності до електронів	Електронегативність χ	Жорсткість μ	М'якість σ	Індекс електрофільності ω	Індекс електрофільності ε
Молочна кислота	11.4279	0.6233	5.4023	6.0256	0.1659	1.3505	0.7404
Сечовина	10.5173	2.0243	4.2465	6.2708	0.1594	1.06162	0.9419
Бетаїн	10.0103	0.93854	4.5358	5.47442	0.1826	1.13397	0.8818
Холін хлорид	9.8745	0.2489	4.8128	5.0617	0.1975	1.2032	0.8311
Ксилітол	9.4573	0.2765	4.5904	4.8669	0.2054	1.1476	0.8713
Пролін	9.6873	0.9687	5.2054	4.4819	0.2231	1.30135	0.7684

ність зростає. Найнижчі значення у холін хлориду (10.123eV), ксилітолу (9.733 eV) та проліну (10.65 eV).

Абсолютна електронегативність (χ) є одним з основних параметрів, що характеризує здатність молекул до хімічної взаємодії. Вважається, що індекс електрофільності корелює із електронегативністю та жорсткістю, тоді як нуклеофільність є оберненою величиною. Чим вище значення електрофільності, тим більше здатна молекула приймати електрони. Таким чином, при передбаченні реакційної здатності для утворення НЕР, органічні сполуки із вираженими нуклеофільними властивостями характеризуються меншим значенням електронегативності (χ) та індексу нуклеофільності (ω), в той час як ефективний електрофіл проявляє високі значення μ та індексу електрофільності (ω). Отже, якщо досліджувані сполуки порівнювати між собою і розглядати їх як акцептори водневого зв'язку при утворенні НЕР, то більш оптимальним є застосування холін хлориду, та проліну.

На другому етапі роботи оцінювали КХР параметри НЕР. Припускали, що взаємодія сполук відбувається відповідно до уявлень *Пірсона і Парра* [10] і тому було представлено з концепції методу кінцевих різниць в залежності від спорідненості до електрону (A) і енергії іонізації (I) будь-яких хімічних видів (атом, іон або молекула). Тобто ефективність взаємодії оцінена використовуючи $E_{ВЗМО}$ донора і $E_{НВМО}$ акцептора при формуванні НЕР (таблиця 3). Порядок електронегативності наступний: $-3,99 > -4,24 > -4,60 > -4,71 > -5,24 > -5,38$ як НЕР-1 > НЕР-4 > НЕР-6 > НЕР-5 > НЕР-3 > НЕР-2.

Найвищий індекс електрофільності у НЕР-2 (1,34 eV), наведений у таблиці 3.

З таблиці 5 чітко видно, що позитивні полярні центри представлені негативними значеннями σ , і навпаки для негативних зон полярності. Негативні та позитивні області вказують на прогнозний ефект притягання та відштовхування відповідно, і чим більші ці області, тим очікуваніше сильніший ефект. Утворення водневих зв'язків між холін хлоридом або бетаїном і сечовиною можливе відповідно по реакційним центрам, що показано в табл. 5 для досліджуваних сполук. Три основні області включають область донорних центрів, неполярну область і область центрів акцепторів.

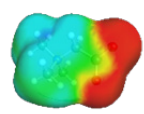
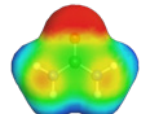
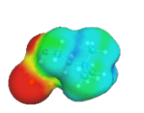
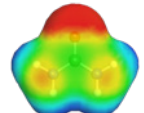
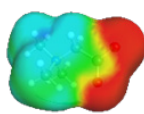
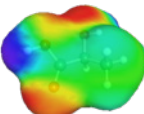
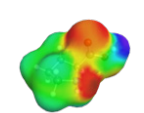
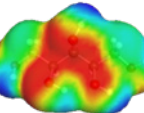
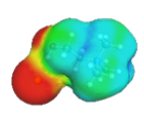
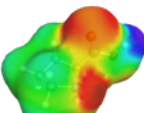
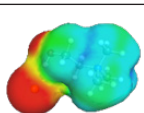
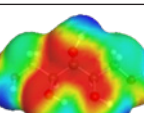
Висновки. В результаті квантово-хімічних розрахунків електронних і енергетичних характеристик молекул проведено оцінку реакційної здатності складових для формування НЕР за наступними індексами: значення енергетичних параметрів ($E_{ВЗМО}$ та $E_{НВМО}$), енергетична щільність молекулярних орбіталей ($\Delta E = E_{ВЗМО} - E_{НВМО}$), абсолютній електронегативності, жорсткість молекули, м'якості та індекса електрофільності та нуклеофільності, що базуються на теорії функціональної щільності. При доборі складових НЕР, порівнюючи досліджувані сполуки, значення $E_{ВЗМО}$ та донорна здатність зменшується у напрямку Ксилітол (9.4573 eV) < Пролін (-9.6873) < Холін хлорид (-9.8745 eV) < Бетаїн (-10.0103eV) < Сечовина (-10.5173eV) < Молочна кислота (-11.4279 eV). За аналізом індексу електрофільності акцепторна здатність сполук при формуванні НЕР наступна: Молочна кислота < Пролін < Холін хлорид < Ксилітол < Бетаїн < Сечовина. Оцінено КХР параметри утворених НЕР. Порядок збільшення електронегативності для НЕР наступний: $-3,99 > -4,24 >$

Квантово-хімічні параметри НЕР

Скорочення	Акцептор водневого зв'язку	Донор водневого зв'язку	$\Delta E = \text{ВЗМО} - \text{НВМО}$	χ , eВ	η , eВ	σ , eВ	ω
НЕР-1	Бетаїн	Сечовина	12,03	-3.99	6.01	0.16	0.998
НЕР-2	Холін Хлорид	Сечовина	10,26	-5.38	5.13	0.19	1.345
НЕР-3	Бетаїн	Молочна кислота	12,36	-5.24	6.18	0.16	1.311
НЕР-4	Пролін	Ксилітол	10,42	-4.24	5.21	0.19	1.061
НЕР-5	Холін Хлорид	Пролін	9,93	-4.71	4.96	0.20	1.179
НЕР-6	Холін хлорид	Ксилітол	9,70	-4.60	4.85	0.20	1.151

Таблиця 5

 σ -профіль для компонентів НЕР

Акцептор водневого зв'язку	σ -профіль	Донор водневого зв'язку	σ -профіль
Бетаїн		Сечовина	
Холін Хлорид		Сечовина	
Бетаїн		Молочна кислота	
Пролін		Ксилітол	
Холін Хлорид		Пролін	
Холін хлорид		Ксилітол	

$-4,60 > -4,71 > -5,24 > -5,38 = \text{НЕР-1} > \text{НЕР-4} > \text{НЕР-6} > \text{НЕР-5} > \text{НЕР-3} > \text{НЕР-2}$. Найвищий індекс електрофільності у НЕР-2 холін хлорид-сечовина (1,34 eВ) та НЕР-3 бетаїн-молочна кислота (1.311 eВ). Серед розчинників НЕР, НЕР-5 (Холін Хлорид-Пролін) та НЕР-6 (Холін хлорид-

Ксилітол) є найкращим розчинником із найменшою енергетичною щільністю (9,93 та 9,70 eВ), найвищим хімічним потенціалом, хімічною м'якістю (0,20 eВ) і помірним індексом електрофільності (1.179 та 1.151eВ) і відносно меншою електронегативністю ($-0,19$ eВ).

Список літератури:

- Achkar El. T., Greige-Gerges H. Fourmentin S. Basics and properties of deep eutectic solvents: a review. *Environ Chem Lett.*, 2021. (19). P. 3397–3408. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01225-8>
- 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.

3. Kalhor P, Ghandi K. Deep Eutectic Solvents as Catalysts for Upgrading Biomass. *Catalysts.*, 2021. 11(2):178. <https://doi.org/10.3390/catal11020178>
4. Vorobyova, V., Skiba, M. & Vasyliiev, 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>
5. Vorobyova, V., Skiba, M., Horodniuk, O. et al. Betaine-Based Deep Eutectic Grape Pomace Extract Mediated Synthesis of Silver Nanoparticles with Antibacterial Activities. *BioNanoSci.*, 2023. pp. 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12668-023-01211-0>
6. Aldongarov, A., Sailau, Z., Almassov, N., & Toshtay, K. Studying the Formation of Choline Chloride and Glucose Based Natural Deep Eutectic Solvent at the Molecular Level. 2022. pp. 1-8. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1198731/v1>
7. Soltanmohammadi, F., Jouyban, A., & Shayanfar, A. New aspects of deep eutectic solvents: extraction, pharmaceutical applications, as catalyst and gas capture. *Chemical Papers*, 2022. 75. pp. 439-453. <http://dx.doi.org/10.1007/s11696-020-01316-w>
8. Zurob, E., Cabezas, R., Villarroel, E., Rosas, N., Merlet, G., Quijada-Maldonado, E., & Plaza, A. Design of natural deep eutectic solvents for the ultrasound-assisted extraction of hydroxytyrosol from olive leaves supported by COSMO-RS. *Separation and Purification Technology*, 2020. 248, 117054. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117054>
9. El-Mansy, M. A. M., El-Nahass, M. M., Khusayfan, N. M., & El-Menyawy, E. M. DFT approach for FT-IR spectra and HOMO–LUMO energy gap for N-(p-dimethylaminobenzylidene)-p-nitroaniline (DBN). *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2013. 111. 217-222. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2013.04.018>
10. F.A. Ashna, A.B. Azeez, M.H. Samir Physical, Thermal and Structural Properties of Choline Chloride: urea Based Ionic Liquids Singap. *J. Sci. Res.*, (2020). 10. pp. 417-424 <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2023.100564>
11. Naseem, Z., Shehzad, R. A., Jabeen, S., Tahir, S., Mushtaq, F., Zahid, M., & Iqbal, J. Quantum chemical investigation of choline chloride-based deep eutectic solvents. *Chemical Physics*, 2023. 571. 111936. <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2023.111936>
12. Shakourian-Fard, M., Taimoory, S. M., Ghenaatian, H. R., Kamath, G., & Trant, J. F. A DFT study of the adsorption of deep eutectic solvents onto graphene and defective graphene nanoflakes. *Journal of Molecular Liquids*, 2021. 327, 114850. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114850>
13. Ayub, A. R., Yaqoob, U., Rafiq, S., Shehzad, R. A., Ayub, K., Iqbal, J., ... & Elsayed, K. A. A Quantum chemical study of outstanding structural, electronic and nonlinear optical polarizability of boron nitride (B12N12) doped with super salt (P7BaNO3). *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 2022. 32(10), 3738-3764. <https://doi.org/10.1007/s10904-022-02371-4>
14. Akman, F. Spectroscopic investigation, HOMO–LUMO energies, natural bond orbital (NBO) analysis and thermodynamic properties of two-armed macroinitiator containing coumarin with DFT quantum chemical calculations. *Canadian Journal of Physics*, 2016. 94(6), 583-593. <https://doi.org/10.1139/cjp-2016-0041>
15. Vorobyova, V. I., Linyucheva, O. V., Chygyrynets, O. E., Skiba, M. I., & Vasyliiev, G. S. Comprehensive physicochemical evaluation of deep eutectic solvents: quantum-chemical calculations and electrochemical stability. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2023. 750(1), pp. 60-68. <https://doi.org/10.1080/15421406.2022.2073037>

**Vorobiova V.I., Andrukhu Yu.M., Morozova D.O., Ziemtsova V.V., Vasyliiev H.S.,
Skyba M.I., Skyba Yu.M. SELECTION OF COMPONENTS FOR THE SYNTHESIS
OF ENVIRONMENTAL IONIC LIQUIDS OF THE NEW GENERATION
ON THE BASE OF QUANTUM-CHEMICAL CALCULATIONS**

In the article, the indices of reactivity in the formation of deep eutectic solvents (DES) are determined on the basis of quantum-chemically determined energy and structural parameters of the molecules of the list of compounds: lactic acid, urea, betaine, choline chloride, xylitol, proline. The density functional theory was used to study the molecular dynamics of DES for the interpretation and justification of the method and quantum-chemical aspects. Comparing the studied compounds, the values of EB3MO and, therefore, the donor capacity decrease in the direction Xylitol (9.4573 eV) < Proline (-9.6873) < Choline chloride (-9.8745 eV) < Betaine (-10.0103 eV) < Urea (-10.5173 eV) < Lactic acid (-11.4279 eV). According to the analysis of the electrophilicity index, the acceptor capacity of compounds during the formation of DES is as follows: Lactic acid < Proline < Choline chloride < Xylitol < Betaine < Urea. The lowest values of molecular orbital gap energy (ΔE) are found in choline chloride (10.123 eV), xylitol (9.733 eV) and proline (10.65 eV). Six NERs were studied: NER-1 Betaine-Urea; DES-2 Choline Chloride-Urea; DES-3 Betaine – Lactic acid;

HER 4 Proline – Xylitol; DES-5 Choline Chloride-Proline; DES-6 Choline chloride-Xylitol. The order of increasing electronegativity for DES is as follows: $-3.99 > -4.24 > -4.60 > -4.71 > -5.24 > -5.38 =$ DES-1 > DES-4 > DES-6 > DES-5 > DES-3 > DES-2. The highest electrophilicity index in DES-2 is choline chloride-urea (1.34 eV) and DES-3 is betaine-lactic acid (1.311 eV). Among DES, DES-5 (Choline Chloride-Proline) and DES-6 (Choline Chloride-Xylitol) are the best solvents with the smallest energy gap (9.93 and 9.70 eV), the highest chemical potential, chemical softness (0.20 eV) and moderate electrophilicity index (1.179 and 1.151 eV) and relatively lower electronegativity (-0.19 eV).

Key words: "green" solvents, low-temperature eutectic solvents, quantum-chemical calculations, indices of reactivity, electronegativity, electrophilicity index, chemical hardness, softness.

Золотарьова О.В.

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ УМОВ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ КОНЦЕНТРОВАНИХ НАТРІЄВИХ ФОФАТІВ

Дане дослідження присвячено визначенню оптимальних умов процесу отримання концентрованих натрієвих фосфатів.

В роботі отримано відсутні раніше відомості по швидкості розчинення карбонату натрію в розчинах динатрійфосфату, по взаємодії ортофосфатної кислоти з компонентами концентрованої содової суспензії, по гранулометричному складу твердої фази содової суспензії; дані щодо впливу швидкості охолодження розчинів на величину пересичення, розміри і фільтруючі властивості кристалів мононатрійфосфату, семиводного динатрійфосфату та десятиводного тринатрійфосфату. Вивчена розчинність в системі карбонат натрію – динатрійфосфат – вода.

На підставі виконаного комплексу фізико-хімічних і технологічних досліджень основних стадій процесу запропоновані нові технічні рішення, розроблена гнучка ресурсозберігаюча технологія семиводного динатрійфосфату та десятиводного тринатрійфосфату.

Потреба в динатрійфосфаті та тринатрійфосфаті велика й не задовольняється в повному обсязі. В зв'язку з цим є актуальною розробка нових високоефективних ресурсозберігаючих технологій фосфатів натрію, що можуть бути покладені в основу будівництва нових виробництв або виробництв, які реконструюються. Одним із напрямів удосконалення виробництва фосфатів натрію є їх переведення на одержання більш концентрованих форм продуктів: семиводного динатрійфосфату та десятиводного тринатрійфосфату.

Натрієві солі ортофосфатної кислоти – тринатрійфосфат (Na_3PO_4), динатрійфосфат (Na_2HPO_4) та мононатрійфосфат (NaH_2PO_4) знаходять широке застосування в багатьох галузях народного господарства.

Мононатрійфосфат використовуються для просочення тканин і дерева з метою надання їм вогнестійкості, оскільки утворений при нагріванні пірофосфат натрію легко плавиться, утворюючи тонку плівку, що ускладнює доступ повітря до горючої поверхні та запобігає запаленню горючого матеріалу. Також мононатрійфосфат застосовують і для отримання поліфосфатів натрію, отриманий продукт застосовують як абразив в складі поліруючих паст, зубних паст та ін.

Динатрійфосфат споживається для культивування дріжджів і в процесі бродіння, в текстильній промисловості для обробки сумішей вовни, бавовни та синтетичного волокна перед фарбуванням, у скляному та керамічному виробництві (фосфатне скло, фарфорові емалі та глазури), в виробництві барвників та пігментів (диспергатор), в якості мінеральної підгодівлі для худоби, як емульгатор при виробництві сирів. Для вищипування дріжджових культур також використовується й мононатрійфосфат.

Динатрійфосфат використовується в якості багатоцільової добавки в харчовій промисловості E339, як емульгатор і буфер для виробництва плавлених сирів і в якості добавки для запобігання перетворення молока в желе. Добавки динатрійфосфату в макарони прискорюють приготування їжі. У фармакології при виготовленні лікарських препаратів використовуються проники, буферні та водоутримуючі властивості мононатрійфосфату. Він також входить до складу пральних порошків та інших миючих засобів, де виступає в якості пом'якшувача води та буферу.

Основні області застосування ди- та тринатрійфосфатів: внутрішньокотлова обробка води для попередження утворення накипу або його видалення, пом'якшення та обробка води для живлення котлів. Фосфати натрію реагують з солями жорсткості з утворенням нерозчинних солей, які виділяються в вигляді пластівців, які легко видаляються в міру їх накопичення.

Тринатрійфосфат залишається одним з компонентів миючих складів і дешевих пральних засобів, використовується для чищення та прибирання приміщень, для запобігання осадження накипу на нагрівачах води в пральних машинах і для прання виробничої спецодеж. Використовуючи миючі властивості тринатрійфосфату його вводять до складу мастильно-охолоджуючих рідин при механічній обробці металів. Тринатрійфосфат застосовують також у складі добавок до бетонів з метою запобігання усадкі бетону в процесі схоплювання. Добавка до бетонів на основі тринатрійфосфату значно прискорює схоплювання розчину.

Тринатрійфосфат вводять до складу силікатних клеїв для прискорення затвердіння композиції та виключення викривлення виробів, що склеюються. При отриманні сульфатного мила з відходів чорних лугів при варінні целюлози їх обробляють тринатрійфосфатом для збільшення виходу мила.

Ключові слова: динатрійфосфат, тринатрійфосфат, ортофосфорна кислота, кальцинована сода, розчинність, нейтралізація.

Постановка проблеми. В останні роки є актуальною розробка нових високоефективних ресурсозберігаючих технологій фосфатів натрію, що можуть бути покладені в основу будівництва нових виробництв або виробництв, які реконструюються. Одним із напрямів удосконалення виробництва фосфатів натрію є їх переведення на одержання більш концентрованих форм продуктів: семиводного динатрійфосфату та десятиводного тринатрійфосфату.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми дослідження оптимальних умов процесу отримання концентрованих розчинів натрієвих фосфатів розглядалися у роботах Федюшкін Б. Ф., Почиталкіна І. А., Кобецької Н. Р. та інших вчених. Однак і сьогодні під час проведення експерименту, дана проблема викликає багато запитань.

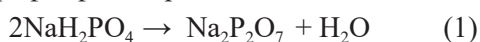
Метою дослідження є визначення оптимальних умов процесу отримання концентрованих розчинів фосфатів натрію, котрі забезпечують можливість виділення з них без додаткового випарювання менш водних кристалогідратів фосфатів натрію та розробка на їх підставі ресурсозберігаючої технології концентрованих динатрій- та тринатрійфосфатів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

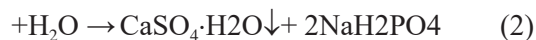
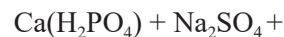
1. Одержання мононатрійфосфату

Всі фосфати натрію одержують нейтралізацією термічної ортофосфатної кислоти. Мононатрійфосфат двоводний ($\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) отримують нейтралізацією 25%-вої ортофосфатної кислоти розчином карбонату натрію густиною 1300–1320 кг/м³. В результаті одержують розчин з густиною 1400–1420 кг/м³. Після випарювання даного розчину до 58–59%мас. розчин очищають фільтрацією від фосфатів заліза та алюмінію. Розчин охолоджують до 20–25°C, відфуговують кристали мононатрійфосфату, що випадають в осад, і фасують в дерев'яні бочки або фанерні барабани з поліетиленовим вкладишем [2]. Маточний розчин концентрацією 45–46%мас. NaH_2PO_4 використовують при розчиненні соди та частково повертають на стадію нейтралізації.

При сушці упареного розчину в розпилувальній сушарці отримують безводний мононатрійфосфат. Температуру сушки підтримують в межах 100°C. При підвищенні температури понад 100°C мононатрійфосфат розкладається та переходить в кислий пірофосфат натрію:



Запропоновано [3] одержувати мононатрійфосфат з суперфосфату, обробляючи його при температурі 60–70°C 30%-вим розчином сульфату натрію. При цьому в результаті реакції:



отримують після відділення гіпсу, що випадає в осад, розчин мононатрійфосфату. Після упарювання розчину з нього кристалізують двоводну сіль.

Для підвищення чистоти мононатрійфосфату, одержуваного з екстракційної ортофосфатної кислоти, розчин перед відділенням фільтрацією речовин, які випадають в осад при нейтралізації кислоти, піддають термообробці при температурі 100–200°C під тиском, що виключає закипання.

Високої чистоти розчин мононатрійфосфату отримують екстракцією кислоти трибутилфосфатом з реекстракцією мононатрійфосфатного розчину в присутності динатрійфосфату, що нейтралізує кислоту до однозаміщеного фосфату.

Запропоновано мононатрійфосфат отримувати взаємодією ортофосфатної кислоти, розчиненої в трибутилфосфаті, з содою в присутності зворотного маточного мононатрійфосфату. Вважають, що з екстракційної ортофосфатної кислоти може бути отриманий досить чистий продукт. Для підвищення чистоти мононатрійфосфату, одержуваного з екстракційної ортофосфатної кислоти неочищеної, пропонують осаджувати сіль нейтралізацією до рН 5,8–6,0 і кристалізацією з нього політермічним методом для відділення від фосфатів полуторних оксидів. Сіль, що випадає в осад, повторно розчиняють, знову нейтралізують гідроксидом натрію до рН 5,8–6,0 і кристалізують при 80–83°C чисту сіль. Недоліком способу є необхідність використання на обох етапах гідроксиду натрію (більш дорогого в порівнянні з содою).

2. Одержання динатрійфосфату

Динатрійфосфат зазвичай отримують нейтралізацією ортофосфатної кислоти содою до досягнення значення рН = 9,5–9,7. Для цього готують содову суспензію з вмістом 420–450 г/л карбонату натрію, розчиняючи соду в воді при температурі 70–90°C. Ортофосфатну кислоту в трьох послідовно з'єднаних проточних реакторах обробляють содовою суспензією при температурі 80–100°C. Готовий розчин динатрійфосфату містить 300–320 г/л Na_2HPO_4 і до 10 г/л вільного Na_2CO_3 . Отриманий розчин фільтрують і заливають в кристалізатори періодичної дії. Розчин охолоджують протягом 12 годин до температури 15–20°C охолоджувальною водою і кристали солі, що випадають в осад, відділяють на центрифугі. Кристали з центрифуги затарюють в фанерні барабани з поліетиленовим вкладишем. Вологість кристалів динатрійфосфату становить ~ 2% [1].

З метою отримання динатрійфосфату з екстракційної ортофосфатної кислоти запропоновано виділяти фосфати полуторних оксидів, що осаджуються при нейтралізації кислоти, після досягнення в розчині $\text{pH} = 3\text{--}3,5$ і витримки розчину при температурі $75\text{--}90^\circ\text{C}$. Очищений розчин донейтралізують до необхідної величини pH , упарюють і подають на сушку з утворенням кормового динатрійфосфату.

З метою виключення витрати соди запропоновано розчин динатрійфосфату отримувати взаємодією ортофосфатної кислоти, що містить $30\text{--}75\%$ мас. P_2O_5 , з хлоридом натрію при $130\text{--}200^\circ\text{C}$ до утворення динатрійфосфату безводного [1]. Хлористий водень з отриманого продукту віддувають повітрям. Недоліком процесу є присутність в продукті пірофосфатів натрію, що утворюються при розкладанні ортофосфату. Тому динатрійфосфат рекомендується використовувати для виробництва пірофосфату натрію термічною дегідратацією при температурі $300\text{--}400^\circ\text{C}$.

Для підвищення чистоти виділеної суміші солей фосфатів натрію пропонують нейтралізацію ортофосфатної кислоти гідроксидом лужного металу проводити при 85°C до $\text{pH} = 5,8\text{--}6,0$. З насиченого розчину політермічно кристалізувати суміш фосфатів. Виділені солі знову пропонують розчинити в воді, додати в розчин гідроксид натрію до $\text{pH} = 5,8\text{--}6,0$, розчин упарити та кристалізувати суміш солей. Отримана суміш солей містить меншу кількість домішок, що цілком зрозуміло. Однак застосування гідроксиду натрію при нейтралізації другого водневого іона економічно не виправдане.

Для отримання концентрованого продукту в вигляді безводного динатрійфосфату його осаджують з нейтралізованого, насиченого при температурі $90\text{--}105^\circ\text{C}$ розчину методом ізотермічної кристалізації. Для цього процес нейтралізації проводять при температурі вище точки перитектики розділення ліній осадження безводної та двоводної солей. При цьому підтримують постійне співвідношення твердої та рідкої фаз, що дорівнює $1\text{--}3$. Для цього при безперервному технологічному процесі упарюють воду, що надходить з нейтралізованим розчином і виділяється за реакцією нейтралізації. Процес характеризується великими витратами тепла гріючої пари випаровування всієї цієї води. Центрифуга, на якій відділяють кристали, працює в надзвичайно важких умовах. Через неможливість теплоізоляції поверхні фільтрації відбувається постійне наростання солі на кошиках і виникає необхідність частих промивок

центрифуги. Згодом це призводить до додаткових витрат тепла на випарювання додаткової промивної води та маточного розчину. Всі домішки, що приходять з содою (до $0,8\%$ мас. NaCl) і ортофосфатною кислотою, повністю переходять в продукт, через що отримують динатрійфосфат, який задовольняє вимогам тільки до продукту марки Б, придатному для застосування в виробництві кераміки або антипірену.

З цієї точки зору більш простим і економічним є метод, в якому нейтралізацію завершують ізотермічною кристалізаційною сушкою, але випарювання здійснюють за допомогою димових газів з температурою $600\text{--}650^\circ\text{C}$. Якість одержуваного таким чином продукту з тих же причин досить низька. Присутній в газах діоксид вуглецю зв'язує гідроксид натрію, що утворюється в ході гідролізу динатрійфосфату в карбонат натрію:

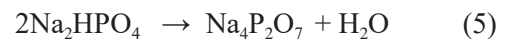


В результаті при відсутності вільного гідроксиду в розчині швидкість гідролізу зростає й загальний ступінь гідролізу динатрійфосфату в розчині може сягати $30\text{--}35\%$.

Для отримання безводного гранульованого динатрійфосфату розроблений процес сушки розчину в аерофонтанній сушарці, що має високу ефективність. Причому сушка може проводитися й гарячим повітрям.

Дванадцятиводний динатрійфосфат при нагріванні вище $35,4^\circ\text{C}$ плавиться з виділенням води в ході одночасної кристалізації семиводної солі. Це призводить до злежування продукту та істотно знижує споживчі властивості дванадцятиводного динатрійфосфату.

При термічній дегідратації динатрійфосфату при $350\text{--}400^\circ\text{C}$ отримують пірофосфат натрію [5, 6] за реакцією



Процес проводять на обладнанні виробництва триполіфосфату натрію, змінивши ступінь нейтралізації ортофосфатної кислоти та температуру кальцинації.

3. Одержання тринатрійфосфату

При отриманні тринатрійфосфату нейтралізацію ортофосфатної кислоти здійснюють у дві стадії. На першій стадії кислоту нейтралізують содовою суспензією, що містить $420\text{--}450$ г/л карбонату натрію. При цьому отримують розчин динатрійфосфату, що містить $300\text{--}320$ г/л Na_2HPO_4 і має $\text{pH} = 9,6\text{--}9,7$. Даний розчин далі нейтралізують 42% -вим розчином гідроксиду натрію до значення

pH = 12,1–12,5. Повністю нейтралізований розчин містить 310–360 г/л Na_3PO_4 і до 1,5 г/л вільного NaOH. Оскільки виробництво моно- або динатрійфосфату компонується з виробництвом тринатрійфосфату, то маточні розчини від одержання менш заміщених солей, а так само промивні води утилізуються в виробництві тринатрійфосфату. Тому нейтралізований розчин в цьому випадку розбавляється ними до 250–260 г/л Na_3PO_4 . При виділенні товарного тринатрійфосфату кристалізацією на барабанному кристалізаторі нейтралізований розчин упарюють до вмісту Na_3PO_4 680–720 г/л і кристалізують отриманий плав у вигляді дванадцятиводної солі. При виділенні тринатрійфосфату в розпилювальній сушарці [1] розчин подають в сушарку без попереднього розпарювання.

Тринатрійфосфат у вигляді десятиводної солі запропоновано отримувати з відведених розчинів осаджувальних ванн виробництва віскозного волокна.

При вдосконаленні виробництва одноводного тринатрійфосфату для одержання продукту з високою насипною щільністю та підвищення в ньому частки основної речовини запропоновано сушку розчину виконувати в дві стадії. На першій стадії швидкість видалення вологи підтримують на рівні 650–715 кг/годину, а температуру теплоносія – 500–650°C. При цьому досягається залишковий вміст вологи 25–31,5%мас. На другій стадії підтримують швидкість видалення вологи 80–98 кг/годину, а теплоносій має температуру 200–250°C. Підтримування такого режиму безсумнівно ускладнить не тільки конструкцію апарату, а й ускладнить управління процесом, з причини відсутності автоматичних датчиків визначення вологості порошкоподібних матеріалів настільки високої чутливості.

Більш концентрований тринатрійфосфат у вигляді напівводної солі отримують [1] нейтралізацією ортофосфатної кислоти 30–80%-вим розчином гідроксиду натрію до досягнення співвідношення $\text{Na}_2\text{O} : \text{P}_2\text{O}_5 = 3,3 \div 5,0 : 1$. Кристали $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ що випадають, виділяють при 50–120°C центрифугуванням. Продукт має високу чистоту та може використовуватися в харчовій промисловості. Однак собівартість такого продукту, дуже висока.

Судячи з наявних даних [7], основна частина динатрійфосфату та тринатрійфосфату виробляється в вигляді мало концентрованого дванадцятиводного кристалогідрату. З огляду на велику потребу в кормовому динатрійфосфаті цілком обґрунтовано прагнення організувати його бага-

тотоннажне виробництво в вигляді безводної солі сушкою розчину. Проводяться дослідження й по одержання безводного тринатрійфосфату.

Оскільки при сушці розчину всі домішки переходять в продукт, то така технологія прийнятна для отримання фосфатів натрію, що застосовуються в галузях, які не пред'являють до фосфатів обмежувальних вимог щодо складу продукту. Тому отримання чистих продуктів харчового призначення більш доцільно проводити з використанням політермічної кристалізації. У зв'язку з цим представляє великий практичний інтерес одержання фосфатів у більш концентрованій товарній формі, але без сушки всього розчину. Такими можуть бути семиводний динатрійфосфат і десятиводний тринатрійфосфат. Оскільки їх політермічне осадження можливе тільки з більш концентрованих розчинів, а застосування випарювання розчинів економічно недоцільно, то для отримання концентрованих вихідних розчинів содовий розчин, що застосовується на стадії першої нейтралізації, повинен вносити в процес менше води, тобто він повинен бути в вигляді більш концентрованої содової суспензії. Або ж частину соди на першу нейтралізацію слід подавати в твердому вигляді, що значно ускладнить технологію нейтралізації ортофосфатної кислоти.

Одержання содової суспензії з великим співвідношенням мас твердої та рідкої фаз призводить до технологічних ускладнень через забивання трубопроводів осадженою содою. Дане протиріччя може бути вирішено, з огляду на обмежений баланс води, збільшенням маси рідкої фази в содовій суспензії за рахунок рециркуляції частини готового розчину динатрійфосфату. Однак дані по розчиненню карбонату натрію в розчинах динатрійфосфату в літературі відсутні, що робить необхідним детальне дослідження содорозчинення в розчинах динатрійфосфату. Необхідно виконати також дослідження кристалізації семиводного динатрійфосфату та десятиводного тринатрійфосфату, відомості за якими також відсутні, а також вивчити властивості утворених розчинів.

Висновки. Для вирішення поставленої мети нам необхідно:

- вивчити розчинення карбонату натрію в розчинах динатрійфосфату та визначити умови одержання більш концентрованих содових суспензій;
- дослідити кінетичні закономірності взаємодії окремих компонентів концентрованої содової суспензії з розчином ортофосфатної кислоти;
- визначити розподілення домішок і вплив швидкості охолодження розчину на розмір кри-

талів і їх фільтруючі властивості вивченням кристалізації динатрійфосфату;

– визначити оптимальний режим одержання кристалів, які добре фільтруються, дослідженням кристалізації тринатрійфосфату;

– перевірити принципову можливість отримання менш водного продукту на обладнанні з виробництва ди- і тринатрійфосфат дослідженням кристалізації мононатрійфосфату;

– визначити відсутні в літературі відомості з рівноважної розчинності в спільних водних розчинах карбонату натрію та динатрійфосфату,

з властивостей розчинів ди- і тринатрійфосфату і з механічних властивостей одержуваних продуктів з меншим вмістом гідратної води;

– перевірити можливий варіант очищення відхідних газів содорозчинення та нейтралізації ортофосфатної кислоти;

– на основі вивчення фізико-хімічних та технологічних умов і властивостей розчинів розробити ресурсозберігаючу технологію більш концентрованих динатрійфосфату та тринатрійфосфату, в порівнянні з діючою технологією, за якою отримують дванадцятиводні фосфати.

Список літератури:

1. Волошин М. Д., Черненко А. В., Іванченко М. А., Олійник М. А. Технологія неорганічних речовин. Частина 3. Мінеральні добрива : навчальний посібник / М. Д. Волошин, Я. М. Черненко, А. В. Іванченко, М. А. Олійник. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2016. 354 с.

2. Яворський В. Т. Технологія сірки і сульфатної кислоти / В. Т. Яворський Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2010. 404 с.

3. Астрелін І. М., Запольський А. К., Супрунчук В. І., Прокоф'єва Г. Н. Теорія процесів виробництва неорганічних речовин / І. М. Астрелін, А. К. Запольський, В. І. Супрунчук, Г. Н. Прокоф'єва // Під ред. д-ра техн. наук проф. А. К. Запольського. К. : Вища школа, 1992. 399 с.

4. Золотарьова О. В. Визначення оптимальних умов проведення процесу очистки екстракційної фосфатної кислоти від сульфат-іонів карбонатом стронцію / О. В. Золотарьова, О. Я. Паливода // Wykształcenie i nauka bez granic. 2018 : Nauka i studia : materiały XIV Międzynar. nauk.-prakt. konf., 07-15 grudnia 2018. Przemysł, 2018. Str. 68-70.

5. Конспект лекцій з дисципліни «Нові хімічні технології» для студентів спеціальності 161 Хімічні технології та інженерія / Укладачі: Волошин М. Д., Ларичева Л. П. Кам'янське : ДДТУ, 2016. 74 с.

6. Мулярчук І. Ф. Твердофазні виробництва мінеральних солей. / І. Ф. Мулярчук, М. П. Вовкотруб // Київ : Національний аграрний ун-т України, 1998. 235 с.

7. Астрелін І. М., Товажнянський Л. Л., Лобойко О. Я. Технологія фосфоровмісних добрив, кислот і солей : підручник / І. М. Астрелін, Л. Л. Товажнянський, О. Я. Лобойко [та ін.] ; за ред. Л. Л. Товажнянського. Харків : Вид-во «Підручник НТУ «ХП», 2011. 288 с.

Zolotarova O.V. STUDY OF THE OPTIMAL CONDITIONS OF THE PROCESS OF OBTAINING CONCENTRATED SODIUM PHOSPHATE

This study is dedicated to determining the optimal conditions for the process of obtaining concentrated sodium phosphates.

In the scientific work, previously missing information was obtained on the rate of dissolution of sodium carbonate in disodium phosphate solutions, on the interaction of orthophosphate acid with the components of concentrated sodium suspension, on the particle size composition of the solid phase of sodium suspension; data on the influence of the cooling rate of solutions on the degree of supersaturation, sizes and filtering properties of crystals of monosodium phosphate, disodium phosphate heptahydrate, and trisodium phosphate decahydrate. Solubility in the sodium carbonate-disodium phosphate-water system was studied.

On the basis of the performed set of physico-chemical and technological studies of the main stages of the process, new technical solutions were proposed, a flexible resource-saving technology of disodium phosphate heptahydrate and trisodium phosphate decahydrate was developed.

The need for disodium phosphate and trisodium phosphate is large and not fully met. In this regard, the development of new highly effective resource-saving technologies of sodium phosphates, which can be laid as a basis for the construction of new factories or factories that are being reconstructed, is relevant. One of the ways to improve the production of sodium phosphates is their transfer to obtain more concentrated forms of products: disodium phosphate heptahydrate and trisodium phosphate decahydrate.

Sodium salts of orthophosphate acid - trisodium phosphate (Na_3PO_4), disodium phosphate (Na_2HPO_4) and monosodium phosphate (NaH_2PO_4) are widely used in many sectors of the national economy.

Monosodium phosphate is used to impregnate fabrics and wood in order to make them fire resistant, as the sodium pyrophosphate formed when heated melts easily, forming a thin film that makes it difficult for air to reach

the combustible surface and prevents the combustible material from igniting. Monosodium phosphate is also used to obtain sodium polyphosphates, the resulting product is used as an abrasive in polishing pastes, toothpastes, etc.

Disodium phosphate is consumed for the cultivation of yeast and in the fermentation process, in the textile industry for the treatment of wool, cotton and synthetic fiber mixtures before dyeing, in glass and ceramic production (phosphate glass, porcelain enamels and glazes), in the production of dyes and pigments (dispersant), in qualities of mineral feeding for cattle, as an emulsifier in the production of cheeses. Monosodium phosphate is also used to grow yeast cultures.

Disodium phosphate is used as a multipurpose additive in the food industry E339, as an emulsifier and buffer for the production of processed cheeses and as an additive to prevent milk from turning into jelly. Additions of disodium phosphate to pasta speed up cooking. In pharmacology, the laxative, buffering and water-retaining properties of monosodium phosphate are used in the manufacture of medicinal products. It is also included in washing powders and other detergents, where it acts as a water softener and buffer.

The main areas of application of di- and trisodium phosphates are: internal boiler water treatment to prevent the formation of scale or its removal, softening and treatment of water for feeding boilers. Sodium phosphates react with hardness salts to form insoluble salts, which are released in the form of flakes that are easily removed as they accumulate.

Trisodium phosphate remains one of the components of detergents and cheap laundry detergents, it is used for cleaning and tidying premises, to prevent scale deposition on water heaters in washing machines and for washing industrial overalls. Using the cleaning properties of trisodium phosphate, it is introduced into the composition of lubricating and cooling fluids during mechanical processing of metals. Trisodium phosphate is also used as an additive to concrete to prevent concrete shrinkage during setting. An additive to concrete based on trisodium phosphate significantly accelerates the setting of the solution.

Trisodium phosphate is introduced into the composition of silicate glues to accelerate the hardening of the composition and to eliminate distortion of the glued products. In the production of sulfate soap from waste black alkali during the cooking of cellulose, they are treated with trisodium phosphate to increase the yield of soap.

Key words: *disodium phosphate, trisodium phosphate, orthophosphoric acid, soda ash, solubility, neutralization.*

УДК 622.5:628.477.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/16>**Іванченко А.В.**

Дніпровський державний технічний університет

Сорока О.В.

Дніпровський державний технічний університет

Воронов В.В.

Дніпровський державний технічний університет

ВИЛУЧЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ ІЗ ВОДНИХ СЕРЕДОВИЩ ЛІГНОЦЕЛЮЛОЗНИМ СОРБЕНТОМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ АДСОРБЕРА З ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ

Зроблено огляд науково-технічної літератури в області вилучення іонів важких металів з промислових стічних вод. Важкі метали відносяться до небезпечних груп речовин стічних вод промислових підприємств та не піддаються біологічному розкладанню, що зумовлює необхідність застосування адсорбційного методу. Перевагами сорбційних металів є висока ефективність та відсутність вторинних забруднень. Сорбційні матеріали поглинають із водних розчинів метали екологічно безпечної концентрації. Запропоновано лабораторну модель адсорбера з псевдозрідженим шаром ступінчасто-протиточного типу, особливістю якого є подача стічних вод знизу, а адсорбенту зверху. Потік рідини, що очищується, піднімається вгору через розподільні отвори решіток, створюючи на них киплячі шари. Досліджено можливість очищення модельних розчинів від іонів нікелю(II), плюмбуму(II), купруму(II) та кадмію природним лігноцелюлозним сорбентом. Вихідна концентрація політанту у модельному розчині становила 200 мг/дм³. Ступінь видалення іонів нікелю при застосуванні лігноцелюлозного сорбенту через 3 години контактування становить 78,95 %, плюмбуму – 53,85 %, кадмію – 64,5 %, купруму – 70,1 %.

Встановлено вплив тривалості адсорбції на ступінь вилучення політантів. На основі отриманих експериментальних даних одержано концентрації іонів важких металів від тривалості сорбції. Визначено можливість практичного використання лігноцелюлозного сорбенту при вилученні іонів важких металів з водних середовищ. Запропоновано конструкцію промислового адсорбера з псевдозрідженим шаром, основними конструктивними елементами якого є циліндричний корпус з конічним дном, трубопровід подачі забруднених стоків, оснащений конічною решіткою з виступами, пристрої для відводу сорбенту та очищених стоків. Відпрацьований сорбент рекомендовано використовувати як паливо для виробництва енергії.

Ключові слова: лігноцелюлозний сорбент, нікель(II), плюмбум(II), купрум(II), кадмій, водні середовища, модельні розчини, адсорбер з псевдозрідженим шаром.

Постановка проблеми. Стічні води підприємств багатьох галузей промисловості містять у своєму складі іони важких металів, що представляють серйозну небезпеку з погляду їх біологічної активності, внаслідок мутагенного, канцерогенного та патогенного впливу на навколишнє. Важкі метали відносяться до однієї з найбільш небезпечних груп речовин, забруднюючих біосферу, постійно зустрічаються у стічних водах підприємств гірничо-збагачувальних комбінатів, а також на коксохімічних і металургійних підприємствах. Беручи до уваги, що ці метали не піддаються біологічному розкладанню, виникають серйозні проблеми щодо їх видалення з джерел водопостачання [1].

Найбільших збитків вони завдають, гідросфері, а максимальне скидання у водоймища до 80% становлять промислові води. Зі стоками щорічно у довкілля скидається до 952 млн.м³ токсичних забруднених стоків, що містять до 5 тис. т важких металів. При цьому 30–35% цих стоків потрапляє до річок, озер та інших водних об'єктів, а іноді сполуки важких металів перевищують рівень гранично допустимих концентрацій. Для більшості регіонів України гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у водних об'єктах господарсько-питного та культурно-побутового водокористування становлять: для купруму(II), нікелю, плюмбуму(II) та кадмію до 0,1–0,5 мг/дм³, а для цинку 1–5 мг/дм³ [2]. Підвищення ефектив-

ності очищення таких водних середовищ, поряд з пошуком шляхів зниження вартості подібних технологій, є актуальним завданням. Одним із напрямків рішення цієї задачі є використання дисперсних сорбентів для очищення водних середовищ замість традиційних реагентів. Адсорбційний метод глибокого очищення широко застосовують для очищення стічних вод від іонів важких металів. Однак широкому впровадженню адсорбційних методів для процесів екологічної безпеки перешкоджає висока вартість адсорбентів, наприклад, активного вугілля.

За своїми властивостями лігноцелюлозний сорбент (СЛЦ) наближається до слабокислотних катіонітів і, будучи на порядок дешевшим за них, може вважатись їх доступним аналогом. СЛЦ можна використовувати для ефективного очищення промислових технологічних середовищ і стічних вод від органічних і неорганічних домішок, важких металів і радіонуклідів. Продукт можна застосувати на промислових наливних фільтрах, відцентрових екстракторах тощо, для очищення технологічних середовищ хімічної, коксохімічної і нафтохімічної промисловості, а також для очищення технологічних середовищ від радіонуклідів і трансуранових елементів підприємств ядерно-паливного циклу [10].

Останнім часом для очищення різних типів забруднених вод все більшого застосування знаходять неорганічні сорбенти, які мають певні переваги над синтетичними органічними іонообмінниками. Низька вартість та доступність природних сорбуючих матеріалів (глинистих мінералів, цеолітів, оксидів та ін.), достатня механічна міцність та хімічна стійкість обумовлює перспективність застосування цих матеріалів в технології очищення вод. Таким чином, існуючі на сьогоднішній день технології переробки рідких радіоактивних відходів високого та середнього рівнів активності дозволяють ефективно видаляти радіонукліди техногенного та природного походження із водного середовища. Проте при виборі методу дезактивації великих об'ємів малоактивних вод першочерговим стає економічний фактор. В цьому випадку доцільним є застосування сорбційних технологій із використанням сорбентів на основі дешевих природних матеріалів, зокрема глинистих мінералів або біологічних об'єктів [8].

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Сорбційне вилучення металів із стічних вод отримало достатньо широке поширення внаслідок високої ефективності та відсутності вторинних забруднень. Сорбційні матеріали поглинають із

водних розчинів метали практично до будь-якої концентрації.

У роботі [3] досліджено процеси очищення води від важких металів при їх висадженні калій фероціанідом. Показано, що при очищенні води від йонів купруму(II) та плумбуму(I) шляхом комплексоутворення з калій ціанофератом при використанні нанофільтрування після відстоювання та механічного фільтрування ефективність вилучення йонів важких металів зростає. Вивчено ефективність зв'язування ціаноферату калію та йонів міді при взаємодії з полікатіонними флокулянтами.

Досліджено адсорбцію іонів Cr(VI) нативною подрібненою шкаралупою кісточок *Prunus armeniaca*. Визначено, що при початковій концентрації 5 мг/дм³ рН = 2,30 хв контактування та дозуванні адсорбенту 20 г/дм³ максимальна сорбційна ємність склала 0,037 мг/г. Ізотерми адсорбції найбільш адекватно описуються моделлю Фрейндліха ($R^2 = 0,990$), а кінетика процесу підпорядковується моделі другого порядку [4].

Підвищити сорбційні характеристики подрібненої шкаралупи кісточок абрикоса можливо шляхом впливу на них ультразвуковою обробкою. Так, вплив останньої потужністю 200 Вт протягом 15 хв із частотою 22 кГц сприяє збільшенню максимальної сорбційної ємності з 6,6 мг/г до 9,9 мг/г за іонами Cr(VI). Максимальна сорбційна ємність спостерігається при рН = 2 при початковій концентрації іонів Cr(VI) 75 мг/дм³. Визначено, що при початковій концентрації названих іонів 25, 50 та 75 мг/дм³ ступінь їх видалення нативним сорбційним матеріалом становить 45,6%, 32,4% та 25,8%, після обробки ультразвуком – 62,4%, 47,2% та 28,4% [5].

Також нативна шкаралупа кісточок абрикоса досліджувалася як сорбційний матеріал для видалення іонів Cu²⁺ в статичних умовах. Знайдено, що максимальна сорбційна ємність, що дорівнює 4,5 мг/г, досягається при рН = 5, початковій концентрації іонів Cu²⁺ 60 мг/дм³ та дозуванні сорбційного матеріалу 6 г/дм³. Визначено, що основним механізмом є іонний обмін. Ізотерма адсорбції добре описується моделлю Ленгмюра, а кінетика сорбції підпорядковується моделі псевдо другого порядку [6].

Подрібнена шкаралупа волоського горіха з розмірами частинок 1,6–2,5 мм досліджувалася для вилучення в статичних умовах сорбції іонів Fe³⁺ з початковою концентрацією 3 мг/дм³. Встановлено, що при дозі адсорбенту 10 г/дм³ при рН=7 ступінь видалення іонів Fe(III) становить 92,7% через 240 хв контактування. Визначено, що сорбційна

здатність порошку шкаралупи волоського горіха збільшується з підвищенням температури, що вказує на перебіг хемосорбції, а ізотерма адсорбції відповідала моделі Фрейндліха [7].

Рослинні матеріали, такі як деревина, трави та сільськогосподарські культури, є лігноцелюлозними комплексами, що складаються з целюлози, геміцелюлози, лігніну та інших компонентів у менших кількостях. Лігноцелюлозні матеріали виявляють відповідні сорбційні властивості завдяки багатокомпонентному складу та наявності різноманітних активних функціональних груп. Основними перевагами біосорбції є доступність сировини, простота експлуатації, висока ефективність, дешевизна процесів і легка утилізація відпрацьованих біосорбентів шляхом спалювання. Потенціал біосорбції різноманітних агропромислових відходів був продемонстрований різними дослідниками [9].

Якість поверхневих природних вод вказує на поступове збільшення вмісту солей важких металів у водоймах та водотоках. Серед методів захисту водних об'єктів від сполук важких металів найважливішим є сорбційний метод з використанням природних неорганічних сорбентів. дозволяє очікувати високу ефективність їх застосування у процесах очищення природних та стічних вод. Вони в десятки разів дешевші за штучні органічні та неорганічні сорбенти, що при масштабному забрудненні водних об'єктів є важливою економічною перевагою.

Дисперсні кремнеземи мають осадове походження. Вони від 10 до 95% складаються з гідратної форми кремнезему $x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ (де $x > y$), що містить різні домішки мінерального та органічного походження. Розрізняють три види крем'янистих порід: діатоміти, трепели та опоки.

У даній роботі досліджено можливість очищення модельних розчинів від іонів нікелю(II), свинцю(II), купруму(II) та кадмію природним лігноцелюлозним сорбентом.

Мета дослідження – експериментально дослідити процес видалення іонів важких металів нікелю(II), свинцю(II), міді та кадмію із модельних розчинів лігноцелюлозним сорбентом із використанням модельного адсорбера з псевдозрідженим шаром. Запропонувати конструкцію промислового адсорбера.

Виклад основного матеріалу. Лігноцелюлозний сорбент із природної сировини (шкаралупи волоського горіха) готували наступним чином: матеріал спочатку подрібнювали, класифікували і відбирали фракції розміром 0,6–1,6 мм. Потім

сорбент обробляли 57% розчином HNO_3 протягом 4 год при постійному перемішуванні. Далі тверду фазу промивали водопровідною дистильованою водою до $\text{pH} = 7-8$ і висушували при температурі 130°C протягом 3 годин. Надалі суміш обробляли кислотно-сольовим розчином, який містив 20% H_3PO_4 , 40% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, і 40% H_2O , при постійному перемішуванні протягом 4 годин (таке співвідношення компонентів робочого розчину є максимально ефективним і дає змогу проводити активацію сировини за кімнатної температури – $15-25^\circ\text{C}$). Після активації суміш знову фільтрували, відділяючи фільтрат в окрему ємність, а сорбент кондинціонували шляхом витримки у воді протягом 6 діб. Потім воду повертали на промивку сорбенту. Після активації целюлоза і лігнін, перестають бути зв'язані в біополімерні комплекси, що характеризуються високим сорбційними та іонообмінними властивостями. Оскільки у целюлози в кожній елементарній ланці містяться гідроксильні групи, вони можуть реагувати з важкими металами [7].

Для проведення досліджень адсорбції іонів нікелю(II), свинцю(II), купруму(II) та кадмію із водних середовищ створено лабораторну модель адсорбера з псевдозрідженим шаром для очищення модельних розчинів від солей важких металів природним сорбентом, що показана на рисунку 1.

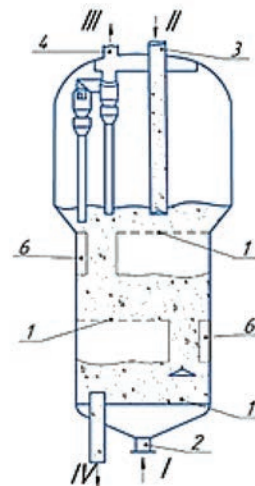


Рис. 1. Лабораторна модель адсорбера з псевдозрідженим шаром

У псевдозрідженому шарі процес сорбції інтенсифікується завдяки поліпшенню процесу масопередачі речовини, що адсорбується, з об'єму до поверхні адсорбенту. Однак внаслідок інтенсивного перемішування в спільному киплячому шарі вирівнюються концентрації речовини,

що адсорбується в шарі, і зменшується рухома сила. З метою інтенсифікації процесу застосовують адсорбери ступінчасто-протиточного типу (рис. 1). Потік рідини подається знизу через штуцер 2, а адсорбент зверху через стояк 3. Потік рідини, що очищається, піднімається вгору через розподільні отвори решіток, створюючи на них киплячі шари. Псевдозріджений адсорбент перетікає з тарілки на тарілку переточними трубами 6. Така конструкція забезпечує сталість рівня адсорбенту на тарілках. Сорбційні характеристики досліджуваних зразків сорбентів, отримані експериментальним шляхом, показано у таблиці 1.

Таблиця 1
Сорбційні характеристики досліджуваних зразків сорбентів

Важкі метали	Початкова концентрація, мг/дм ³	Кінцева концентрація, мг/дм ³			Ступінь сорбції, %
		1 год	2 год	3 год	
Ni ²⁺	200	174	96,0	42,1	78,95
Pb ²⁺	200	165,6	131,2	92,3	53,85
Cd ²⁺	200	178	112,3	71,0	64,50
Cu ²⁺	200	149	93,5	59,7	70,15

Встановлено, що ефективність сорбції протягом 3 годин складає: для Ni²⁺ – 78,95%, Pb²⁺ – 53,85%, Cd²⁺ – 64,50%, Cu²⁺ – 70,1%.

Сорбція важких металів модифікованими лігноцелюлозними сорбентами найкраще протікає в діапазоні рН 4–7 і визначається природою сорбційних центрів гідроксильних і карбоксильних груп лігноцелюлозного матеріалу і електронодонорних N-, S- та P- містких груп, прищеплених внаслідок хімічної ви фізико-хімічної модифікації.

Запропоновано конструкцію промислового адсорбера. Конструкція апарату відноситься до очищення стічних вод сорбцією і може бути використано для доочищення стічних вод природним сорбентом. В результаті промислового впровадження адсорбера дотягатиметься підвищення надійності експлуатації адсорбера за рахунок збільшення продуктивності апарата та економії сорбенту.

На рисунку 2 зображений загальний вигляд запропонованого адсорбера у розрізі.

Адсорбер складається з циліндричного корпусу з конічним дном і розташованому в ньому заслінкою та розподільником, трубопровід подачі регулюючого потоку води, оздоблений конічною решіткою з виступами, а пристрій для відводу сорбенту та трубопровід подачі регулюючого потоку води з'єднаний з верхнім конусом розподільника, розміщеного в нижній частині конічного дна.

Адсорбер включає циліндричний корпус 1 адсорбера з конічним дном 2. В верхній частині корпусу 1 розміщений трубопровід 3 подачі сорбенту, збірні жолоби 4 та трубопровід 5 відводу очищеної води. У внутрішній частині конічного дна 2 коаксіально розташована решітка 6, над отворами якої навісають концентричні козирки 7.

У внутрішній частині конічного дна 2 коаксіально розташована решітка 6, над отворами якої навісають концентричні козирки 7.

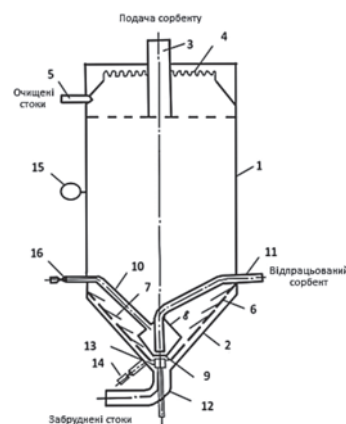


Рис. 2. Адсорбер для очищення стічних вод від важких металів: 1 – циліндричний корпус; 2 – конічне дно; 3 – трубопровід подачі сорбенту; 4 – збірні жолоби; 5 – трубопровід відводу очищеної води; 6 – решітка; 7 – козирки; 8 – розгалужувач; 9 – отвір; 10 – трубопровід для регулювання витрати сорбенту; 11 – трубопровід для відводу використаного сорбенту; 12 – трубопровід для подачі очищеної води; 13 – закривач розгалужувача; 14 – ревізія; 15 – аналізатор; 16 – задвижка

В просторі, обмеженому решіткою 6 та основою конічного дна 2 розташований розподільник 8. В основі нижнього корпусу розподільника 8 є отвір 9. До верхнього корпусу розподільника 8 подається трубопровід 10 подачі води для регулювання витрат сорбента. У внутрішню порожнину розподільника 8 підведений трубопровід 11 відводу відпрацьованого сорбенту. В нижній частині конічного дна 2 встановлений затвор 13 розподільника 8 та ревізія 14. На середині висоти завантаження розміщений аналізатор 15, а на трубопроводі 10 встановлена заслінка 16.

Запропонований адсорбер дозволяє підвищити надійність експлуатації за рахунок створення вихідного потоку води в нижній частині конічного дна. Подача води в завантаження сорбенту через отвори перфорованої конічної стінки зумовлює зрідження сорбенту практично по всьому шляху просування його до вузла розвантаження, чим попереджується утворення застійних зон в конічній частині адсорбера. Крім того, запропонований адсорбер за рахунок підвищення продуктивності апарату, дає економію сорбенту в рази.

Відпрацьований сорбент можна використовувати як паливо для виробництва енергії. Питома теплота згоряння відпрацьованих сорбентів, які використовуються для очищення стічних вод від масел складає 22857–25220 кДж/кг, від важких металів 19079–21117 кДж/кг. Значення питомої теплоти згоряння відпрацьованих сорбентів, отриманих із залишкової біомаси, не менше, ніж у класичних палив, таких як вугілля.

Висновки. Для вилучення іонів нікелю(II), плумбуму(II), купрум(II), кадмію з водних середо-

вищ використано адсорбент із природної сировини на основі шкарлупи волоського горіха. Досліджено процес вилучення Ni^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} початковою концентрацією 200 мг/дм³, при застосуванні лігноцелюлозного сорбенту тривалістю сорбції 1–3 год. Встановлено, що ефективність вилучення через 3 год сорбції складає: для Ni^{2+} – 78,95%, Pb^{2+} – 53,85%, Cd^{2+} – 64,50 %, Cu^{2+} – 70,1 %. Запропоновано конструкцію промислового адсорбера. Відпрацьований сорбент рекомендовано використовувати як паливо для виробництва енергії.

Список літератури:

1. Гуляєв В.М., Кравченко О.В., Коваленко А.Л., Єлатонцев Д.О., Манойленко Д.А. Застосування сорбційних матеріалів на основі золи виносу ТЕС у процесах кондиціонування високомінералізованих стічних вод. Збірник наукових праць ДДТУ № 1(42). 2023. С. 21.
2. Мисник О.Ф., Литвиненко А.О. Забрудненість питної води солями важких металів та вилучення їх з розчинів нанокмполімером цирконію (VI) оксиду. *ScienceRise: Biological Science*. 2016, № 1. С. 32–38.
3. Трус І. М., Гомеля М. Д., Мельниченко Є.В., Мігранова В. О. Очищення води від іонів важких металів відстоюванням, нанофільтруванням та флоатацією. *Технічні науки та технології*. 2019. № 1 (15). С. 204–213.
4. Khazaei I., Aliabad M., Mosavian H.T.H. Use of agricultural waste for removal of Cr(VI) from aqueous solution. *Iranian Journal of Chemical Engineering*. 2011. Vol. 8. Pp. 11–23.
5. Kalipci E., Namal O.O. Removal of Cr(VI) using a novel adsorbent modification. Ultrasonic method with apricot kernel shells. *Environment Protection Engineering*. 2018. Vol. 44. Pp. 79–93. Šoštarić T., Petrović M., Milojković J., Lacičević S., Cosović A., Stanojević M., Stojanović M. Application of apricot stone waste from fruit processing industry in environmental cleanup: copper biosorption study. *Fruits*. 2015. Vol. 70. P. 271–280.
6. Lu. X., Rao T., Zhong L. Static absorption of Fe in simulated micro-polluted water by waste walnut shell powder. *Environmental Pollution & Control (China)*. 2011. Vol. 1. P. 66–69.
7. Ivanchenko A.V., Soroka O.V., Sokol O.D. Removal ions of ferrum(III) and zinc from aqueous environments by chemically activated sorbents from natural raw materials. *Journal of Chemistry and Technologies. Oles Honchar Dnipro National University*. 31 (2). 2023. P. 344–352 doi: 10.15421/jchemtech.v31i2.268276
8. Тобілко В.Ю. Розробка сорбційних технологій захисту вод від забруднення важкими металами та радіонуклідами: дис. канд.техн. наук: 21.06.01. Київ. 2016. 178 с.
9. Трус І.М., Галиш В.В., Гомеля М.Д. Розробка методів переробки осадів та відпрацьованих біосорбентів для створення маловідходних технологій очищення води: монографія. Київ. 2023. С. 116.
10. Д. О. Єлатонцев, А. П. Мухачев, В. І. Супрунчук. Сорбент лігноцелюлозний зі шкарлупи волоського горіха. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т.29, № 1. С. 114.

Ivanchenko A.V., Soroka O.V., Voronov V.V. REMOVAL OF HEAVY METALS FROM AQUEOUS ENVIRONMENTS BY LIGNOCELLULOSIS SORBENT USING A PSEUDO-FLUIDIZED BED ADSORBER

A review of the scientific and technical literature in the field of extraction of heavy metal ions from industrial wastewater was made. Heavy metals belong to the dangerous groups of waste water substances of industrial enterprises and are not subject to biological decomposition, which necessitates the use of the adsorption method. The advantages of sorption metals are high efficiency and the absence of secondary pollution. Sorptive materials absorb metals of environmentally safe concentrations from aqueous solutions. A laboratory model of an adsorber with a fluidized bed of the step-counterflow type is proposed, the peculiarity of which is the supply of wastewater from below, and the adsorbent from above. The flow of liquid to be cleaned rises up through the distribution holes of the grids, creating boiling layers on them. The possibility of purifying model solutions from nickel(II), lead(II), copper(II) and cadmium ions with a natural lignocellulosic sorbent was investigated. The initial concentration of the pollutant in the model solution was 200 mg/dm³. The degree of removal of nickel ions when using a lignocellulosic sorbent after 3 hours of contact is 78.95%, lead – 53.85%, cadmium – 64.5%, copper – 70.1%. The influence of the duration of adsorption on the degree of extraction of pollutants was established. On the basis of the obtained experimental data, the concentration of heavy metal ions was obtained from the duration of sorption. The possibility of practical use of lignocellulosic sorbent in the extraction of heavy metal ions from water environments was determined. The construction of an industrial adsorber with a fluidized bed is proposed, the main structural elements of which are a cylindrical body with a conical bottom, a pipeline for the supply of polluted effluents, equipped with a conical grid with protrusions, devices for the removal of sorbent and purified effluents. The spent sorbent is recommended to be used as fuel for energy production.

Key words: lignocellulosic sorbent, nickel(II), lead(II), copper(II), cadmium, aqueous media, model solutions, fluidized bed adsorber.

Коваль М.Г.

Черкаський державний технологічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД ФАРБУВАЛЬНО-ОПОРЯДЖУВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА АДСОРБЦІЙНИМ МЕТОДОМ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИРОДНОГО ЦЕОЛІТУ

Продукція текстильної промисловості характеризується високою собівартістю, значними витратами води, барвників, допоміжних речовин, теплової та електричної енергії. Важливим економічним та екологічним чинником, який суттєво зменшить собівартість продукції, витрати технологічної води та забезпечить стабільність роботи фарбувально-опоряджувального виробництва при збереженні відповідних показників якості текстильної продукції, є оборотне водопостачання. Це досягається можливістю повторного застосування очищеної стічної води, як технологічної, в процесах фарбування текстильних матеріалів.

У статті представлені результати експериментальних досліджень практичного використання природного сорбенту цеоліту (сокирніту) (Закарпатська обл., Україна) в процесі адсорбційного очищення стічної води діючого фарбувально-опоряджувального виробництва в м. Черкаси (Україна). Для збільшення адсорбційної здатності, природний цеоліт попередньо промивали, термічно активували (при температурі 450°C протягом 4,5 год.) та кислотно модифікували (дія 10% розчином сульфатної кислоти). Очищення здійснювали сорбентом різних фракцій шляхом тривалого контакту рідкої та твердої фаз у стані спокою – завантаження нерухомого шару цеоліту в об'єм стічної води, що очищується. Досліджено, що використання термічно активованого та кислотно модифікованого адсорбенту фракцією 2,5–5,0 мм з подальшою коагуляцією та флокуляцією в процесі очищення стічної води фарбувально-опоряджувального виробництва, призведе до ступеня очищення стічної води в 91%. Методом лабораторного дослідження здійснено фізико-хімічний аналіз очищеної стічної води та пом'якшеної технологічної води фарбувально-опоряджувального виробництва. Одержані результати свідчать про можливість використання адсорбційно очищеної води, як технологічної, в процесі фарбування текстильних матеріалів, що потребує подальших досліджень для розвитку цього напрямку.

Ключові слова: фарбувально-опоряджувальне виробництво, стічна вода, очищення стічних вод, адсорбція, цеоліт, коагуляція, флокуляція.

Постановка проблеми. Текстильна промисловість відіграє важливу роль у глобальному економічному розвитку та індустріалізації розвинених країн. Ця промисловість генерує велику кількість стічних вод (СВ) з широким діапазоном концентрацій забруднюючих речовин, високою хімічною потребою в кисні (ХСК), солоністю, кольором, рН [1, 2]. Відповідно до Стратегії розвитку водної політики України на 2020–2050 рр [3], частка забруднених та недостатньо очищених СВ відносно загального обсягу водовідведення зворотних вод у 2020 році склала 10%. Щороку зі СВ до водних об'єктів скидається біля 2 млн. тонн забруднюючих речовин, що призводить до інтенсивної евтрофікації водойм.

Текстильна продукція, яка випускається, характеризується високою собівартістю, значними витратами води, барвників, допоміжних речовин, теплової та електричної енергії. Велика кількість води використовується на етапах попе-

редньої обробки тканини, відбілювання, фарбування та друку. Ці процеси вимагають близько 100–200 л якісної води на 1кг текстильного продукту [4, 5], для обробки тканин вагою 8000 кг потрібно $1,6 \cdot 10^6$ л води загалом, що становить другий за величиною обсяг води, який споживається всіма галузями промисловості [6]. Вода, що використовується у фарбувальних і ополіскувальних ваннах, містить значну кількість залишкових барвників, і тому текстильні стоки представляють екологічну проблему. Тому, видалення барвників зі СВ та повторне використання води необхідні для уникнення забруднення та захисту природних ресурсів [7].

Вода є високоцінним природним ресурсом та активом і не може розглядатися лише як витратний матеріал. Світовий дефіцит води викликає необхідність в очищенні, переробці та використанні стічних вод. Оборотно водопостачання є важливим економічним та екологічним чинни-

ком, що має бути реалізовано, покращуючи якість продукції та стабільність фарбувально-опоряджувального виробництва [8–10]. Тож, одним із ключових аспектів повторного використання СВ, є здійснення процесів їх очищення з метою повторного використання очищеної води в технології фарбування тканини [11].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Збільшення масштабів виробництва і підвищення вимог до якості води зумовлюють пошук все більш ефективних способів видалення забруднень зі СВ, повернення очищених стоків для повторного використання. Для обробки СВ текстильної промисловості використовуються традиційні методи очищення: фізичні [12], хімічні [13] та біологічні [14]. Але вони недостатньо якісні за фізико-хімічними властивостями для повторного використання води в текстильних процесах [15]. Мембранні процеси: ультрафільтрація, нанофільтрація та зворотний осмос були використані для очищення стічних вод текстильних підприємств і представлені в роботах [16, 17], однак ці процеси дороговартісні і не ефективні. Серед методів, які успішно застосовуються для вирішення складного завдання очищення СВ фарбувально-опоряджувальних виробництв є метод сорбційного очищення. До переваг сорбційного методу відносять: можливість видалення забруднень надзвичайно широкої природи, відсутність вторинних забруднень, використання не дорогих за вартістю адсорбентів, можливість очищення СВ від таких органічних речовин, що не видалялися іншими методами [18].

Використанню природних, натуральних сорбентів в процесах очищення водних розчинів від барвників приділяється багато уваги. В якості адсорбентів застосовують як синтетичні сорбенти (вуглецеві волокнисті матеріали, синтетичні відходи виробництв тощо) [19, 20], так і природні сорбенти (торф, тирса, зола, глинисті породи, лушпиння соняшника тощо). Маючи високу адсорбційну здатність, активоване вугілля є одним з найпопулярніших адсорбентів [21], але має високу вартість, швидке забивання пор, існує проблема десорбції забруднень [22].

У роботі [23] описано використання очищення води від барвників Crystal Violet та Nile Blue за допомогою екологічно чистого активованого вугілля, одержаного із листя фінікової пальми. «Для цього активоване вугілля отримували шляхом хімічної обробки відходів пальмового листя розчинами сульфатної, ортофосфатної та нітратної кислот відповідно, з подальшою карбоніза-

цією шляхом термічної обробки». Дослідження адсорбції барвників цим вугіллям проводили за різних умов, досліджуючи вплив температури, часу, рН, концентрації барвників на процес очищення, що довело ефективність використання такого сорбенту для видалення барвників з водних розчинів.

Жом цукрової тростини ефективно видаляє кислотні барвники [24], виноградні жмаки видаляють хімічно активні барвники [25], а шкаралупа кокосового горіха ефективно видаляє основні барвники, дещо повільніше – прямі барвники [7]. Проте, на ефективність обробки впливають умови процесу адсорбції, включаючи дозу адсорбенту, час контакту, концентрацію адсорбенту, значення рН та температуру.

Дослідники із Туреччини [26] очищували СВ місцевої текстильної фабрики (Sun Tekstil Inc., Ізмір, Туреччина) поєднанням двох різних методів – фото-фентоноподібного окислення та адсорбції, як гібридному процесу, а очищена СВ повторно використовувалася для зрощення сільськогосподарських культур. Очищена вода мала певну солоність, тому може бути використана для стійких до солоності рослин: цукрового буряка, ячменю і бавовни.

Екологічно чиста та мезопориста іракська червона каолінова глина [27] була використана як ефективний та недорогий адсорбент для видалення барвника метиленового синього з водного середовища. Під час дослідження вивчено вплив дозування адсорбенту (0,02–0,20 г) та рН розчину (2–10) і визначено, що ця глина може бути перспективним адсорбентом для видалення досліджуваного барвника з водного середовища. У цьому контексті використання недорогих і природних адсорбентів (глин) є економічним і ефективним методом очищення СВ від барвників [28].

З метою енерго- та ресурсозаощадження основних компонентів фарбувально-опоряджувального виробництва, висувається гіпотеза щодо створення оборотного (циклічного) використання СВ в технології фарбування текстильних матеріалів [29, 30].

Метою роботи є дослідження адсорбційного очищення природним цеолітом (сокирнітом) стічних вод фарбувально-опоряджувального виробництва для їх повторного використання в технології фарбування тканини; моделювання та обґрунтування фізико-хімічних процесів адсорбції барвників та допоміжних речовин в цеоліті для доведення достовірності отриманих експериментальних результатів. Мета роботи, обмежена цією публіка-

цією – представити практичні результати експериментальних досліджень адсорбційного очищення мультикомпонентної стічної води фарбувально-опоряджувального виробництва природним цеолітом до ступеня очищення її використання, як оборотної, в технології фарбування тканини.

Для вирішення визначених завдань застосовувалися сучасні фізико-хімічні методи досліджень: спектрофотометричний, турбідиметричний, відстоювання, фільтрування, висушування, нагрівання. Для візуалізації експериментальних даних використовувалися мова програмування Python, бібліотеки візуалізації інженерних і наукових даних Matplotlib і Seaborn. Python-скрипти для генерації графічних зображень створені в інтегрованій системі розробки Microsoft Visual Studio Code в форматі програмних файлів Jupyter Notebook, JSON.

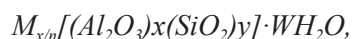
Виклад основного матеріалу. Витрати, температура та концентрація забруднених стічних вод можуть коливатися протягом доби в широких межах, що потребує їх усереднення. При усередненні відбувається інтенсивне змішування СВ різної концентрації та кислотності, при цьому концентрації забруднювачів будуть вирівнюватися повніше, якщо СВ, яка надходить в усереднювач, буде інтенсивніше перемішуватися [31, 32].

Адсорбційному очищенню підлягала усереднена розбавлена (1:100) СВ фарбувально-опоряджувального виробництва ПрАТ «ЧШК» (м. Черкаси, Україна). Адсорбційне очищення води здійснювалося природним цеолітом (сокирнітом) Сокирницького родовища Закарпатської області (Україна) з розміром фракції 1–5 мм (рис. 1).



Рис. 1. Природний цеоліт фракцією 1–5 мм Сокирницького родовища

Іонообмінні властивості цеолітів визначаються особливостями хімічної спорідненості йонів та кристалічної структури сорбенту. До складу цеоліту входять кліноптилоліт (65–80%), монтморилоніт (2–4%), кварц (до 10%), плагіоклаз (5–10%), карбонат (3%), гідрослюда (1–3%). Загальна молекулярна формула має вигляд:



де M – n-валентний катіон металу, здатний до йонного обміну; у/х - атомне співвідношення Si/Al (це

співвідношення змінюється залежно від типу цеоліту); співвідношення x/n – від 1 до 5; W – кількість кристалізованих молекул H₂O в цеоліті [33].

Сорбент володіє підвищеною пористістю, що додає матеріалу високих гідродинамічних характеристик. Пориста структура цеоліту (рис. 2) містить активні обмінні центри і зумовлює унікальні адсорбційні, катіонообмінні та каталітичні властивості.

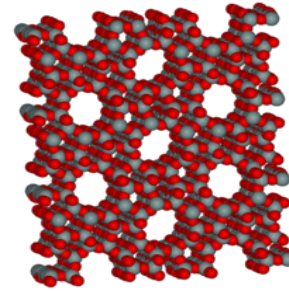


Рис. 2. Мікропориста структура цеоліту [34]

Цеоліти є молекулярними ситами. Вони використовуються для розділення речовин не тільки за принципом вибіркової адсорбції, а сорбують лише молекули речовин, критичний розмір яких менше ефективного розміру вхідного вікна. Адсорбційні властивості цеолітів проявляються після їх зневоднення, так як в процесі синтезу порожнини кристалів заповнюються молекулами води. Вона може бути видалена із кристалів нагріванням до 300–350°C. При цьому решітка більшості цеолітів зберігає свою структуру. Після дегідратації цеоліти володіють високою адсорбційною ємністю. Обсяг пустот в них може скласти до 50% загального обсягу кристалів [35].

Очищення стічних вод природним цеолітом здійснено в такій послідовності: підготовка цеолітових глин; очищення СВ природним цеолітом; термічна активація цеоліту; очищення СВ термічно активованим цеолітом; хімічна модифікація цеоліту; очищення СВ хімічно модифікованим цеолітом; дослідження процесу адсорбції компонентів СВ з подальшою коагуляцією та флокуляцією; фізико-хімічний аналіз СВ; порівняльний аналіз показників очищених СВ та технологічної води для фарбувально-опоряджувального виробництва з можливістю повторного її використання.

Підготовка цеолітових глин полягала в їх просіюванні, промиванні, сушці та термічній активації. Просіювання проводили з метою відділення дрібних часток матеріалів (до 1 мм) задля зниження каламутності в очищеній воді та з метою дослідження впливу різного розміру фракцій на процеси водоочищення. Сорбент був розділений

на дві групи 1–2,5 мм і 2,5–5 мм, які піддавалися дослідженню. Для просіювання використовували механічні сита з різним діаметром просіюючих вічок. Промивання проводили з метою видалення пилу з поверхні сорбенту шляхом обробки його під струменем води. Сушку здійснювали в лабораторній сушильній шафі СНОЛ 100/300 (Україна) при температурі 105°C протягом 1 години, що забезпечує виділення вологи під час нагрівання, не змінюючи структуру самого цеоліту. З метою підвищення адсорбційної здатності цеоліту і збільшення ступеня очищення СВ, глину термічно активували в муфельній печі типу СНОЛ – 1,6.2,5.1/9 – И4 шляхом прожарювання при температурі 450°C протягом 4,5 год, охолоджували без доступу повітря в ексікаторі. «Більш високі температури призводять до зниження сорбційних властивостей глини, що спричинене спіканням глинистих часточок. При цьому кількість активних центрів, з якими взаємодіють молекули адсорбтивів, зменшується внаслідок видалення гідроксильних груп глини» [35].

Стічну воду очищували нативним та термічно активованим сорбентом різних фракцій одним з найбільш розповсюджених та ефективних способів адсорбції – тривалий контакт рідкої та твердої фаз у стані спокою: завантаження нерухомого

шару цеоліту в об'єм СВ, що очищується. Для впровадження цього способу, попередньо підготовлений цеоліт засипали в об'єм СВ (співвідношення «цеоліт:СВ» складає 1:5), перемішували та залишали відстоюватись протягом 24 годин. Після відстоювання рідку та тверду фазу відділяли. Цеоліт направляли на утилізацію, а СВ на доочищення коагуляцією та флокуляцією.

Так як колір барвників є наслідком їх взаємодії зі світлом, то кількісну оцінку кольоровості стічної та очищеної води здійснювали спектрофотометричним методом, використовуючи спектрофотометр UV-5800 PC (КНР). Результати досліджень наведені на рисунку 3.

За результатами значень оптичних спектрів математично обраховано ступінь очищення досліджених водних систем за формулою:

$$\omega = \left(1 - \frac{D_{оч}}{D_{св}}\right) \cdot 100\% \quad (1)$$

де ω – ступінь очищення, %;

$D_{оч}$ – оптична густина очищеної води;

$D_{св}$ – оптична густина розбавленої усередненої стічної води.

Результати обчислень представлені в таблиці 1.

Отже, кращу адсорбційну здатність має термічно активований цеоліт фракцією 2,5–5,0 мм, що є підставою для подальших досліджень цеоліту

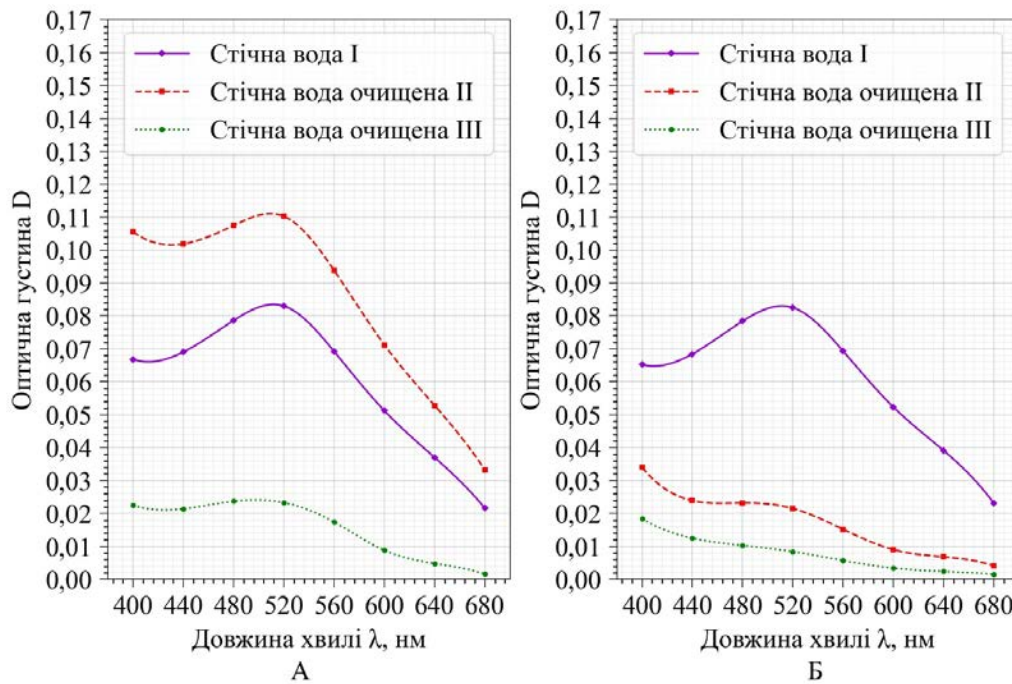


Рис. 3. Оптичні спектри поглинання досліджуваних водних систем при адсорбції природним цеолітом: А – фракції цеоліту 1,0–2,5 мм; Б – фракції цеоліту 2,5–5,0 мм. I – усереднена розбавлена стічна вода; II – стічна вода, очищена нативним цеолітом; III – стічна вода, очищена термічно активованим цеолітом

Таблиця 1

Результати очищення розбавленої усередненої стічної води природним цеолітом

Розмір фракцій цеоліту, мм	Стан цеоліту	Ступінь очищення стічної води, %
1,0–2,5	нативний	6,2
	термічно активований	33,2
2,5–5,0	нативний	23,1
	термічно активований	43

Таблиця 2

Аналіз адсорбційно очищеної стічної води термічно активованим природним цеолітом фракцією 2,5–5,0 мм

Показник	Усереднена стічна вода (середній показник за квартал)	Стічна вода після адсорбційного очищення	Стічна вода, доочищена в результаті коагуляції та флокуляції
Забарвлення (колір)	червоно-коричневий	безбарвний	безбарвний
Каламутність, мг/дм ³	0,81	6,21	0,39
Запах, бали при 20°C	3	1	0
Осад і плаваючі домішки	пластівці	відсутні	відсутні
Загальна лужність, ммоль/дм ³	8,3	7,9	7,7
pH	8,1	7,2	5,2
Хімічне споживання кисню дихроматне (ХСК), мгО ₂ /дм ³	223,83	82,7	16,75
Сольфати (SO ₄ ²⁻), мг/дм ³	виявлено	виявлено	наявний
Хлориди (Cl ⁻), мг/дм ³	наявний	наявний	наявний
Ортофосфати (PO ₄ ³⁻), мг/дм ³	наявний	відсутній	відсутній
Азот амонійний, мг/дм ^{3r}	наявний	наявний	наявний
В'язкість, μ	0,995	0,997	0,995
Ступінь очищення, %	-	43	76

цієї фракції. Через підвищену каламутність очищеної води та недостатньо високі результати очищення, воду доочищували шляхом коагуляції та флокуляції. В якості коагулянту використовували алюміній сульфат Al₂(SO₄)₃ концентрацією 20 г/дм³, коагулюючі властивості якого зумовлені утворенням колоїдного алюміній гідроксиду і основних сульфатів в результаті гідролізу. В процесі коагуляції Al(OH)₃ колоїдні частинки домішок, що знаходяться у воді, захоплюються і виділяються разом з алюміній гідроксидом у вигляді драглистих пластівців Al(OH)₃. Флокулянтом є натрій альгінат (C₆H₇O₆Na)_n, концентрацією 1%, який використовується для підвищення ефективності дії коагулянту та більш повного доочищення води. Методом лабораторних досліджень визначено, що оптимальна доза коагулянту для досягнення максимального ступеня очищення води становить 2 мг/дм³. Каламутність досліджуваних розчинів визначали мутноміром (турбідиметром) CyberScan TB1000 (Нідерланди). Спектрофотометричні показники досліджень представлені на рис. 4.

Результати турбідиметричного аналізу та аналізу деяких фізико-хімічних величин і якісного визначення основних йонів стічної та очищеної води представлено в таблиці 2.

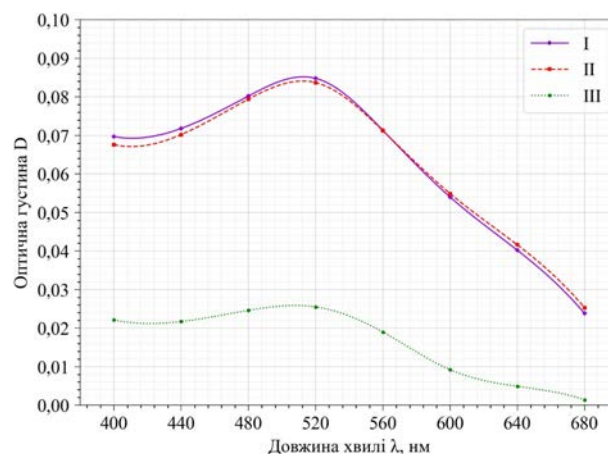


Рис. 4. Оптичні спектри поглинання досліджуваних водних систем при адсорбції цеолітом фракції 2,5–5,0 мм: I – усереднена розбавлена стічна вода; II – стічна вода, очищена термічно активованим цеолітом; III – стічна вода, очищена термічно активованим цеолітом з подальшою коагуляцією та флокуляцією

Аналізуючи результати таблиці 2 та рисунка 4, визначено, що в процесі адсорбції суттєво підвищується каламутність води, яка спричиняє значний скачок показників оптичної густини, які

перевищують показники вихідної стічної води. Проте після коагуляції та флокуляції каламутність води значно знижується, що суттєво визначається показниками оптичної густини. Але в процесі гідролізу коагулянту виділяються іони SO_4^{2-} , внаслідок чого знижується рН. Йонний склад усередненої та очищеної стічної води залишається незмінним. Ступінь очищення 76% є досить низьким та недостатнім для можливого повторного використання очищеної стічної води в технології фарбування тканини з одержанням якісних показників утворених забарвлень. Інтенсифікуючи процес очищення стічної води та посилюючи адсорбційну здатність цеоліту, термічно активованій адсорбент кислотно модифікували. Кислотна обробка є одним з найбільш поширених і простих методів модифікації цеоліту. Аналізуючи результати сучасних досліджень, модифікація цеоліту розчинами хлоридної та нітратної кислот дозволила «видалити Al зі структури, зменшити відносну кристалічність і значно збільшити питому поверхню цеолітних зразків» [36, 37], призвела до розчинення деяких аморфних матеріалів, що закупорюють пори природних цеолітів [38]. Процес фосфатування цеоліту ортофосфатною кислотою [39, 40] може ефективно налаштувати його кислотні властивості та покращити селективність. «Завдяки модифікації цеоліту бурштиновою кислотою, адсорбент демонструє значну NH_4^+ -N адсорбційну здатність, яка значно вища (в 10 разів), ніж у природних цеолітів» [41]. При модифікації адсорбенту розбавленим розчином щавлевої кислоти, каталітична селективність цеоліту була збільшена втричі, адсорбційна активність значно зросла [42]. В процесі кислотної модифікації змінюється структура глинистих матеріалів: руйнуються кристалічні ґратки, збільшується питома поверхня, вимиваються окисли, в результаті чого утворюються порожнини, змінюється пориста структура (збільшується діаметр та об'єм пор), що може сприяти більш ефективному очищенню стічних вод [43].

Дослідний зразок термічно активованого цеоліту поміщали в 10% розчин сульфатної кислоти в об'ємному співвідношенні 1:2 (тверда фаза : розчин), ретельно перемішували і залишали утворену суспензію за нормальних умов на 1 год. По завершенню цього часу, відділяли рідку фазу від твердої та проводили десятикратне промивання цеоліту для відмивання залишків кислоти з поверхні. Промитий цеоліт піддавали осушенню в сушильній шафі при температурі 105°C протягом 30–60 хв до досягнення постійної маси.

В лабораторних умовах кислотно модифікований цеоліт засипали в розбавлену усереднену стічну воду, додавали цеоліт в кількості 1 г цеоліту на 50 мл розбавленої стічної води, залишали для адсорбційного очищення на 24 години нерухомим шаром. Зливали стічну воду, додаючи до неї коагулянт $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ (на 20 cm^3 стічної води додавали 2 cm^3 коагулянту (20 г/л), додавали 6 cm^3 флокулянту $(\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_6\text{Na})_n$ (1%). Дослідження проводили з використанням постійно працюючої електричної мішалки з кількістю обертів 300 об/хв. протягом 5 хв. Утворену суспензію відстоювали протягом 24 годин, фільтрували [44]. Визначали спектрофотометричні показники (рис. 5) та фізико-хімічні властивості очищеної стічної води.

Аналізуючи рисунок 5, в процесі адсорбції суттєво підвищується каламутність води, що спричиняє значний скачок показників оптичної густини. Проте після коагуляції та флокуляції каламутність води видалається, що доведено визначенням каламутності та показниками оптичної густини. В процесі гідролізу коагулянту виділяються іони SO_4^{2-} , внаслідок чого знижується рН (5,2), що свідчить про необхідність додаткової обробки води для вирівнювання цього показнику. З метою вирівнювання рН до нейтрального середовища (рН = 7) проведено процес підлогування з використанням реагенту NaOH. При додаванні луґу, в очищеній воді утворюється білий осад $\text{Al}(\text{OH})_3$, тому одержану суміш піддавали фільтрації, забезпечуючи також видалення залишкового алюмінію. Загальний ступінь очищення становить 91%.

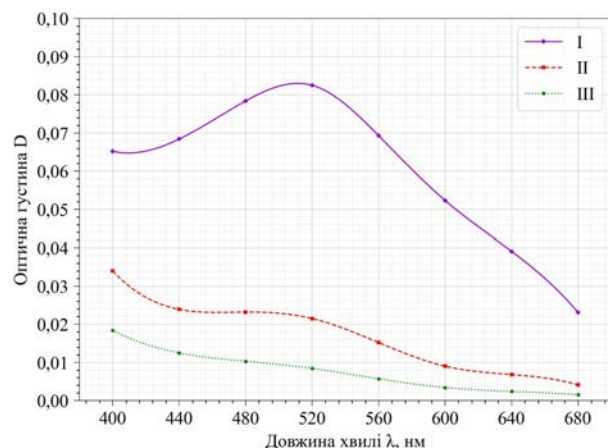


Рис. 5. Оптичні спектри поглинання досліджуваних водних систем при адсорбції цеолітом фракції 2,5-5,0 мм: I – усереднена розбавлена стічна вода; II – стічна вода, очищена термічно активованим цеолітом з подальшою коагуляцією та флокуляцією; III – стічна вода, очищена термічно активованим та кислотно модифікованим цеолітом з подальшою коагуляцією та флокуляцією

Порівняльний аналіз досліджених водних систем

Показник	Усереднена розбавлена стічна вода (середній показник за квартал)	Стічна вода, доочищена в результаті коагуляції та флокуляції	Пом'якшена технологічна вода ПрАТ «ЧШК»
Забарвлення (колір)	червоно-коричневий	безбарвний	безбарвний
Каламутність, мг/дм ³	0,81	0,16	0,1
Запах, бали при 20°C	3	0	0
Осад і плаваючі домішки	пластівці	відсутні	відсутні
Загальна лужність, ммоль/дм ³	8,3	7,7	7,5
pH	8,1	7,27	7,36
Хімічне споживання кисню дихроматне (ХСК), мгО ₂ /дм ³	223,83	2,84	2,79
Сульфати (SO ₄ ²⁻), мг/дм ³	152,8	3,7	3,57
Хлориди (Cl ⁻), мг/дм ³	137	0,17	0,12
Ортофосфати (PO ₄ ³⁻), мг/дм ³	0,84	не виявлено	не виявлено
Азот амонійний, мг/дм ³	6,95	0,1	0,09
В'язкість, μ	0,998	0,995	0,993
Загальна твердість*, ммоль/дм ³	-	0,15	0,1

*Допустимий загальний вміст твердості для технологічної води під час фарбування тканини знаходиться в межах 0–25 ppm (0–0,25 ммоль/дм³) [45]. При твердості більшій ніж 0,25 ммоль/дм³, барвник не закріплюється на тканині, що призводить до необхідності повторної обробки та фарбування, а в подальшому до утилізації сувою бракованої тканини.

З метою можливого повторного використання очищеної стічної води в технології фарбування тканини, досліджено фізико-хімічні властивості пом'якшеної технологічної води ПрАТ «ЧШК» (пом'якшення здійснюється за допомогою Катіоніту КУ-2-8 ГОСТ 20298-74 П.12 т.2) та порівняно її з властивостями очищеної води. Результати дослідження наведені в таблиці 3.

Результат фізико-хімічного аналізу підтверджує відповідність очищеної стічної води до технологічної пом'якшеної води. Отже, очищена стічна вода може бути використана повторно в технологічному процесі фарбування тканини, що і буде об'єктом подальших досліджень.

Відпрацьований сорбент цеоліт належить до побічних твердих відходів процесу очищення СВ фарбувально-опоряджувального виробництва, містить в порах молекулярної сітчастої структури молекули текстильних барвників та допоміжних речовин. З метою утилізації чи можливого його повторного використання, проводилися дослідження щодо визначення токсичності відпрацьованого цеоліту, зокрема фітотоксичності [46]. Методом лабораторного фітототестування визначена фітотоксичність відпрацьованого цеоліту, яка не перевищує 20%, що вказує на відсутність чи слабкий рівень його токсичності та можливість повтор-

ного використання в галузі дорожнього будівництва та у виробництві будівельних матеріалів.

Висновки. Здійснення процесів очищення стічних вод адсорбційним методом є одним із ключових аспектів повторного їх використання, як вторинного ресурсу, в технології фарбування тканини. Експериментально встановлено, що ступінь очищення стічних вод фарбувально-опоряджувального виробництва в 91% досягається шляхом використання адсорбенту природного цеоліту (сокирніту) фракцією 2,5–5,0 мм з подальшою коагуляцією та флокуляцією. Перед застосуванням цеоліт потребує попередньої підготовки: промивання, термічної активації (при температурі 450°C протягом 4,5 год.) та кислотної модифікації (дія 10% розчином сульфатної кислоти). Результат фізико-хімічного аналізу підтверджує відповідність очищеної стічної води до технологічної пом'якшеної води, що свідчить про можливість її використання в технології фарбування текстильних матеріалів та потребує подальших досліджень для розвитку цього напрямку. Відпрацьований сорбент цеоліт має низький рівень токсичності (до 20%), що свідчить про можливість його повторного використання в галузі дорожнього будівництва та у виробництві будівельних матеріалів.

Список літератури:

1. Mokhtar N.M., Lau W.J., Ismail A.F., Kartohardjono S., Lai S.O., Teoh H.C. The potential of direct contact membrane distillation for industrial textile wastewater treatment using PVDF-Cloisite 15A nanocomposite

membrane. *Chemical Engineering Research and Design*. 2016, Volume 111, P. 284–293 <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.05.018>

2. Ćurić I., Dolar D., Bošnjak J. Reuse of textile wastewater for dyeing cotton knitted fabric with hybrid treatment: Coagulation/sand filtration/UF/NF-RO. *Journal of Environmental Management*. 2021, Volume 295, P. 113-133. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113133>

3. Стратегія розвитку водної політики України на 2020 – 2050 pp. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/04/KMU_Water-Strategy_new.pdf (дата звернення 16.01.2024).

4. Yin, H., Guo, H., Qiu, P., Yi, L., Li, J. Case analysis on textile wastewater subjected to combined physicochemical–biological treatment and ozonation. *Desalin. Water Treat.* 2017, № 66, P. 140–148. [Google Scholar] <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.1619>

5. Nazlı Caglar Cinperi, Emrah Ozturk, Nevzat Ozgu Yigit, Mehmet Kitis. Treatment of woollen textile wastewater using membrane bioreactor, nanofiltration and reverse osmosis for reuse in production processes. *Journal of Cleaner Production*. 2019, Volume 223, P. 123-135. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.166>

6. Meerambika Behera, Jayato Nayak, Shirsendu Banerjee, Sankha Chakraborty, Suraj K. Tripathy. A review on the treatment of textile industry waste effluents towards the development of efficient mitigation strategy: An integrated system design approach. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021, Volume 9, Issue 4. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105277>

7. Aljeboree A.M., Alshirifi A.N., Alkaim A.F. Kinetics and equilibrium study for the adsorption of textile dyes on coconut shell activated carbon. *Arabian Journal of Chemistry*. 2017, Volume 10, Supplement 2, P. S3381-S3393. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.01.020>

8. Sonaje, N. P., Chougule, M. B. Municipal Wastewater Recycling In Cotton Textile Wet Processing. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication (IJRITCC)*. 2015, Volume 3, Issue 3 ISSN: 2321-8169, P. 992–1000, DOI: 10.17762/ijritcc2321-8169.150321. (1) Municipal Wastewater Recycling In Cotton Textile Wet Processing – A Review | *International Journal IJRITCC and Nitin Sonaje – Academia.edu*

9. Lellis B, Fávoro-Polonio CZ, Pamphile JA, et al. Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms. *Biotechnology Research and Innovation*, 2019, Volume 3, Issue 2, P. 275–290. <https://doi.org/10.1016/j.biori.2019.09.001>

10. Roop Kishor, Diane Purchase, Ganesh Dattatraya Saratale, Rijuta Ganesh Saratale, Luiz Fernando Romanholo Ferreira, Muhammad Bilal, Ram Chandra, Ram Naresh Bharagava. Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021, Volume 9, Issue 2. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105012>

11. Мазур І.В., Саблій Л.А. Сучасні методи очистки стічних вод у природних умовах. Матеріали XXI Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство», м. Київ, Україна, 2020, С. 69–72.

12. Tarcísio W. Leal, Luís A. Lourenço, Ana S. Scheibe, Selene M.A. Guelli U. de Souza, Antônio A. Ulson de Souza. Textile wastewater treatment using low-cost adsorbent aiming the water reuse in dyeing process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018, Volume 6, Issue 2, P. 2705-2712. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.04.008>

13. I Wayan Koko Suryawan, Mia Siregar, Gita Prajati, Anshah Afifah. Integrated Ozone and Anoxic-Aerobic Activated Sludge Reactor for Endek (Balinese Textile) Wastewater Treatment. *Journal of Ecological Engineering*, 2019, Volume 20, Issue 7, P. 169-175 DOI: 10.12911/22998993/109858

14. Rabia Shoukat, Sher Jamal Khan, Yousuf Jamal. Hybrid anaerobic-aerobic biological treatment for real textile wastewater. *Journal of Water Process Engineering*. 2019, Volume 29, P. 123-138. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100804>

15. Buscio V., Marín M.J., Crespi M., Gutiérrez-Bouzán C. Reuse of textile wastewater after homogenization–decantation treatment coupled to PVDF ultrafiltration membranes. *Chemical Engineering Journal*. 2015, Volume 265, P. 122-128. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.12.057>

16. Mehmet Dilaver, Selda Murat Hocaoglu, Gülfem Soydemir, Mehtap Dursun, Bülent Keskinler, İsmail Koyuncu, Meltem Ağtaş. Hot wastewater recovery by using ceramic membrane ultrafiltration and its reusability in textile industry. *Journal of Cleaner Production*. 2018, Volume 171, P. 220-233. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.015>

17. Zahraa S. H., Gzar H. A. Evaluation of the Performance of MBR-RO Technology for Treatment of Textile Wastewater and Reuse. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, P. 584. DOI: 10.1088/1757-899X/584/1/012049

18. Запольський А. К. Фізико–хімічні основи технології очищення стічних вод / А.К. Запольський, Н.А. Мішкова–Клименко, І.М. Астрелін, М.Т. Брик, П.І. Гвоздик, Т.В. Князькова – К.: Лібра, 2000. – 552 с.

19. Яровий С.М., Бовсуновський Є.О. Використання природних матеріалів у процесах доочищення стічних вод. Наука і молодь. Прикладна серія: збірник наукових праць. 2009, № 2, С. 53–56.
20. Ghorbel-Abid I., Trabelsi-Ayadi M. Competitive adsorption of heavy metals on local landfill clay. *Arabian Journal of Chemistry*. 2015, Volume 8, № 1, P. 25–31.
21. Rozada F., Otero M., Parra J.B., Garcia A.I. Producing Adsorbents from Sewage Sludge and Discarded Tyres Characterization and Utilization for the Removal of Pollutants from Water. *Chemical Engineering Journal*. 2005, Volume 114 (1-3), P. 161-169. DOI: 10.1016/j.cej.2005.08.019
22. Xiao-Yan Yang, Bushra Duri. Application of Branched Pore Diffusion Model in the Adsorption of Reactive Dyes on Activated Carbon. *Chemical Engineering Journal*. 2001, Volume 83 (1), P. 15-23. DOI: 10.1016/S1385-8947(00)00233-3
23. Maliha Parvin. Adsorption of dyes on activated carbon from agricultural wastes. United Arab Emirates University. 2015. DOI: 10.13140/RG.2.2.13722.44481 https://www.researchgate.net/publication/306251020_ADSORPTION_OF_DYES_ON_ACTIVATED_CARBON_FROM_AGRICULTURAL_WASTES#fullTextFileContent
24. Tsai W.T., Chang C.Y., Lin M.C., Chien S.F., Sun H.F., Hsieh M.F. Adsorption of acid dye onto activated carbons prepared from agricultural waste bagasse by ZnCl₂ activation. *Chemosphere*. 2001, Volume 45, Issue 1, P. 51-58. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(01\)00016-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(01)00016-9)
25. Hanane Belayachi, Benaouda Bestani, Nouredine Benderdouche, Mostefa Belhakem. The use of TiO₂ immobilized into grape marc-based activated carbon for RB-5 Azo dye photocatalytic degradation. *Arabian Journal of Chemistry*. 2019, Volume 12, Issue 8, P. 3018-3027. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.06.040>
26. Fehmiye Gül, Tokay Yılmaz, Gulen Tekin, Gülin Ersöz, Süheyda Atalay. Reclamation of real textile wastewater by sequential advanced oxidation and adsorption processes using corn-cob based materials. *Environmental Pollution*. 2023, Volume 335, 15. P. 122-196. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122196>
27. Jawad Ali H., Abdulhameed Ahmed S. Mesoporous Iraqi red kaolin clay as an efficient adsorbent for methylene blue dye: Adsorption kinetic, isotherm and mechanism study. *Surfaces and Interfaces*. 2020, Volume 18, P. 100-422. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2019.100422>
28. Jianzhong Guo, Shunwei Chen, Li Liu, Bing Li, Ping Yang, Lijun Zhang, Yanlong Feng. Adsorption of dye from wastewater using chitosan–CTAB modified bentonites. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2012, Volume 382, Issue 1, P. 61-66. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2012.05.044>
29. Коваль М.Г. Планування та організація експериментальних досліджень циклічного використання ресурсів у технології фарбування текстильних матеріалів (на прикладі барвника Дисперсного темно-синього 3). Вчені записки Таврійського національного університету імкні. В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, Том 33 (72) № 5, 2022. С. 203-209. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.6/32>
30. Коваль М.Г., Романенко Н.Г. Принцип повторного використання стічних вод у процесах фарбування текстильних матеріалів // Технічні науки та технології № 4(30), 2022, С. 169–179. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-169-179](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-169-179)
31. Айрапетян Т.С. Технологія очистки промислових стічних вод / Харків – ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. 2017, 81 с.
32. Айрапетян Т.С. Водопостачання та очистка стічних вод промислових підприємств : конспект лекцій для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології / Т.С. Айрапетян ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021, 138 с.
33. Паспорт якості цеоліту природного Сокириницького родовища (сокирніту). ТОВ «Сокириницький цеолітовий завод». с. Бороняво, Закарпатська обл. (Україна). 2019, 12 с.
34. Tra N.B. What is Zeolite? Structure – classification and applications of zeolite particles. URL: <https://tschem.com.vn/zeolite-la-gi/> (дата звернення 20.01.2024)
35. Фізико-хімічні властивості природних сорбентів та металокомплексних каталізаторів на їх основі: навчальний посібник для студентів хімічного факультету за спеціальністю 102 Хімія / Т.Л. Ракитська, Т.О. Кіосе, А.С. Труба, Л.А. Раскола. – Одеса: Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, 2018, 152 с.
36. Tian H., Liu S., Han Y., Yang K., Xu W. Acid treatment to adjust zeolite hydrophobicity for olefin hydration reaction. *Journal of Porous Materials*. 2022, Volume 29, P. 713-722.
37. Cheng Wang, Liyun Cao, Jianfeng Huang. Influences of acid and heat treatments on the structure and water vapor adsorption property of natural zeolite. *Surface and Interface Analysis*. 2017, Volume 49, Issue 12, P. 1249-1255. <https://doi.org/10.1002/sia.6321>
38. Karmen Margeta, Nataša Zabukovec Logar, Mario Šiljeg, Anamarija Farkas. Natural Zeolites in Water Treatment – How Effective is Their Use. *Water Treatment*. 2013. DOI: 10.5772/50738 <https://www.intechopen.com/chapters/41947>

39. Degnan, T.F., Chitnis, G.K., Schipper, P.H. History of ZSM-5 fluid catalytic cracking additive development at Mobil. *Micropor. Mesopor. Mat.* 2000, Volume 35-36, P. 245–252.
40. Xun Wang Yongkang Lv, Shanhui Zhu, Xuefeng Wang, Cunbao Deng. Phosphoric Acid Modification of H β Zeolite for Guaiacol Hydrodeoxygenation. *Catalysts*. 2021, 11(8), P. 962. <https://doi.org/10.3390/catal11080962>
41. Zixuan Wu, Yuchun Fang, Junjie Zhou, Kai Wang, Bin Tan, Jian Zhou. Succinic acid-assisted modification of a natural zeolite and preparation of its porous pellet for enhanced removal of ammonium in wastewater via fixed-bed continuous flow column. *Journal of Water Process Engineering*. 2022, Volume 48, P. 102–116. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102906>
42. Min Liu, Yanxin Yin, Xinwen Guo, Chunshan Song. Oxalic Acid Modification of β Zeolite for Dehydration of 2-(4'-Ethylbenzoyl) Benzoic Acid. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2017, p. 8850–8856. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b02235>
43. Годовська Ю.Я. Модифіковані природні сорбенти в процесах очищення стічних вод авіапідприємств / НАУКА І МОЛОДЬ. Прикладна серія: 36. наук. праць / редкол. М.С. Кулик [та ін.] – К.: НАУ, 2013. С. 46–49.
44. Спосіб очищення мультикомпонентних стічних вод фарбувально-оздоблювального виробництва. Коваль М.Г., Кузьменко В.Г., Романенко Н.Г. (Україна): пат. 151829 У Україна, МПК C02F 1/28 (2006.01) № u 2021 05931; заявл. 22.10.2021; опубл. 21.09.2022, Бюл. № 38.
45. Olson E.S. *Textile Wet Processes*. Noyes Publications, Park Ridge, N.J., USA,. Vol. 1. 327 p.
46. Koval M.G., Konohrai V.A., Feshchrnko N.V., Romanenko N.G., Yakymenko I.K. Experimental evaluation of phytotoxicity of waste zeolite as a sorbent of wastewater from dyeing and finishing production by laboratory phytotesting. *Science and Innovation*. № 6 (19), P. 77-86, <https://doi.org/10.15407/scine19.06.07>.

Koval M.G. RESEARCH OF WASTEWATER TREATMENT OF DYEING AND FINISHING PRODUCTION BY ADSORPTION METHOD USING NATURAL ZEOLITE

Textile products are characterised by high cost, significant consumption of water, dyes, auxiliary substances, heat and electricity. An important economic and environmental factor that will significantly reduce production costs, process water consumption and ensure the stability of dyeing and finishing operations while maintaining the relevant quality indicators of textile products is water recycling. This is achieved through the possibility of reusing treated wastewater as process water in the dyeing of textile materials.

The article presents the results of experimental studies of the practical use of a natural sorbent zeolite (sokyrnite) (Zakarpattia region, Ukraine) in the process of adsorption treatment of wastewater from an existing dyeing and finishing production in Cherkasy (Ukraine). To increase the adsorption capacity, the natural zeolite was pre-washed, thermally activated (at 450°C for 4.5 hours) and acid modified (by treatment with a 10% sulfuric acid solution). The purification was carried out with a sorbent of different fractions by prolonged contact of the liquid and solid phases at rest – loading a fixed layer of zeolite into the volume of wastewater to be treated. It was found that the use of a thermally activated and acid-modified adsorbent with a fraction of 2.5–5.0 mm, followed by coagulation and flocculation in the process of wastewater treatment of dyeing and finishing production will lead to a degree of wastewater treatment of 91%. The physical and chemical analysis of the treated wastewater and softened process water of the dyeing and finishing production was carried out by the method of laboratory research. The results obtained indicate the possibility of using adsorption-treated water as process water in the process of dyeing textile materials, which requires further research to develop this area.

Key words: dyeing and finishing production, wastewater, wastewater treatment, adsorption, zeolite, coagulation, flocculation.

Melnyk L.I.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Cherniak L.P.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Yevpak V.V.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

COMPOSITES BASED ON FLY ASH WITH DIFFERENT POLYMER MATRIXES

Burshtyn TPP generates electricity through coal combustion, which produces significant volumes of ash, which are accumulated and amount to approximately 40 million tonnes. One of the promising areas of utilisation of this ash is its use in the production of polymer composite materials (PCM). The key aspect in this process is the choice of a polymer binder as a matrix, which determines the main characteristics of PCMs, such as strength, stiffness, thermal and chemical resistance, etc.

The combination of fly ash and a polymer matrix results in a material with improved mechanical and thermal properties compared to traditional materials. The ash component provides heat resistance to the composite, while the polymer matrix adds flexibility and durability.

The use of traditional plastics in the creation of composites leads to an increase in the energy intensity of PCM production due to the significant consumption of thermal energy to convert the polymer into a melt to optimise the mixing process. Therefore, we propose to use a polymer matrix in the form of aqueous polymer dispersions in the development of composite materials. This simplifies and reduces the cost of production of polymer composite materials.

A technology for the production of polymeric composite materials (PCM) is proposed, which includes several stages: mechanical activation of the filler and polymer matrix, forming of blanks and their drying, heat treatment of blanks with subsequent cold pressing.

The process of forming the composite structure and the peculiarities of interaction in the ash-polymer matrix system were studied. The influence of different types of polymer binder on the formation of the porous structure and physical and mechanical characteristics of composites at high filler concentration was evaluated. The possibility of adjusting the properties of composites in a wide range was demonstrated: water absorption from 4.2% to 10.9%, open porosity from 6.03% to 18.40%, Young's modulus from 1.6 MPa to 60.6 MPa.

Key words: composite, filler, fly ash, latex, composition, structure, physical and mechanical properties.

Introduction. Polymeric composite materials (PCMs) are a unique class of composites that consist of a polymer matrix and fillers. These materials acquire a set of properties by combining the advantages of both the matrix and the filler. They are widely used in various industries such as aerospace, mechanical engineering, construction, electronics, sports goods and others.

The choice of starting materials for the production of composites for various purposes is the subject of many studies [1–2]. In particular, an important aspect of consideration is the possibility of using secondary products and waste from various industries as fillers [3–4].

Among the large amount of waste from the thermal power industry, a special place is occupied by ash and fly ash [5].

Coal combustion at thermal power plants in Ukraine produces 7–9 million tonnes of ash and slag annually (50 to 200 grams of ash per 1 kWh of electricity produced) [6], including about 40 million tonnes of ash accumulated at Burshtynska TPP [7].

A promising area of utilisation of TPP fly ash is its use for the manufacture of polymer composite materials. In this case, the choice of a polymeric binder as a matrix is of great importance, as it plays a key role in determining the properties of PCM and determines such characteristics as strength, stiffness, resistance to temperature, chemical resistance, etc.

Fly ash and polymer matrix composites have attracted considerable attention due to their unique properties [8–10]. The combination of ash and polymer matrix results in a material that has improved

mechanical and thermal properties compared to traditional materials. The fly ash component provides the composite with inherent heat resistance, while the polymer matrix provides flexibility and durability.

There are studies [11] on the creation of a composite using up to 40 wt.% of fly ash and household waste PVC as a matrix. It is indicated that the mechanism of surface phenomena at the interface in the fly ash – PVC system is adhesion. Similar results were obtained when creating a composite with up to 40 wt.% fly ash when using LDPE as a matrix [12].

However, the use of polymeric binders in the form of plastic masses (PM) in these works increases the energy intensity of the manufactured composites, since a significant amount of thermal energy is consumed to convert the PM into a melt.

In this regard, studies on the creation of composites using polymeric binders in the form of aqueous dispersions, which simplify and reduce the cost of manufacturing PCM, are of particular interest [13]. In this direction, the present work was carried out, the purpose of which was to identify the features of the structure and properties of polymeric composites based on fly ash during the differentiation of polymeric binders.

Objects and methods of research. A set of physicochemical methods for analysing and testing properties was used in the study.

The mineralogical composition of ash microspheres and the quantitative ratio between phases were determined by X-ray structural analysis using a DRON-3M diffractometer (CuK α radiation, voltage 40 kV, current 20 mA, speed 2 degrees/min). The surface of the samples was examined using an optical microscope with an H5D digital camera. IR spectra in the range of 4000-400 cm⁻¹ were recorded on a Specord IR-75 spectrophotometer (manufactured by Carl Zeis, Germany).

The parameters of the porous structure were determined on evacuated samples by the low-temperature N₂ adsorption-desorption method (T=-196°C) (Quantachrome NOVA-2200e Surface Area and Pore Size Analyzer, USA). The results were processed using the ASiQwin™ V 3.0 software. The specific surface area (S_{BET}, m²/g) was measured by multipoint BET method (Brunauer-Emmett-Teller) [14]. The total pore volume (V_p, cm³/g) was calculated using the maximum adsorbed volume of nitrogen at a relative pressure P/P₀ of 0.99.

The volume of micropores (V_μ, cm³/g) was determined by the t-plot method, and their percentage was calculated using the following formula:

$$V_{\mu}, \% = (V_{\mu} / V_{\Sigma}) * 100\% \quad (1)$$

The mechanical properties of 'deformation-loading' diagrams under uniaxial compression were studied at room temperature using an automated arrangement consisting of IMAIII-20-78, analog-digital converter (ADC), personal computer (PC), and connecting cables. The measurements were performed in a vacuum of 10–5 Torr [15].

The technology of manufacturing a composite based on the polymer-filler water dispersion system consisted of the following operations:

- mechanical activation of the filler and polymer matrix in a ball mill (20 minutes);
- forming of blanks (by mould volume) and their maturation (48 hours at room temperature);
- heat treatment of the workpieces (gradual increase in temperature and holding for 1 hour at 80°C);
- cold pressing of cylindrical samples with a diameter of 10 mm. The object of study was composite materials based on water polymer dispersion – filler systems. The fly ash from Burshtynska TPP (Ash) (Ukraine) was chosen as a filler.

Aqueous dispersions of Latex 2012 copolymer and Policril 590 polymer were used as a matrix for the composite (Table 1).

Table 1

Characteristics of binders

Features.	Indicators.	
	Latex 2012	Policril 590
Chemical composition	Styrene-butadiene	Acrylic
Styrene content, %.	30	-
Physical condition	White aqueous dispersion	White aqueous dispersion
Dry matter content, %.	51,0	53,5–55,0
Particle size, nm	140	200
Viscosity, MPa·s	200	<1000
pH	5,5	5,5–7,5
Temperature (MTU), °C	< 5	0

According to the chemical composition (Table 2), the ash is acidic and is characterised by a quantitative ratio of SiO₂ oxides : Al₂O₃ = 2.6, and a content of alkaline earth and alkaline oxides of 22.2 %.

Table 2

Chemical composition of raw materials

Sample of fly ash	Oxide content, wt. %.								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	n.p.
Burshtynskaska	46,12	18,00	22,17	1,78	4,03	1,46	0,21	2,10	1,49

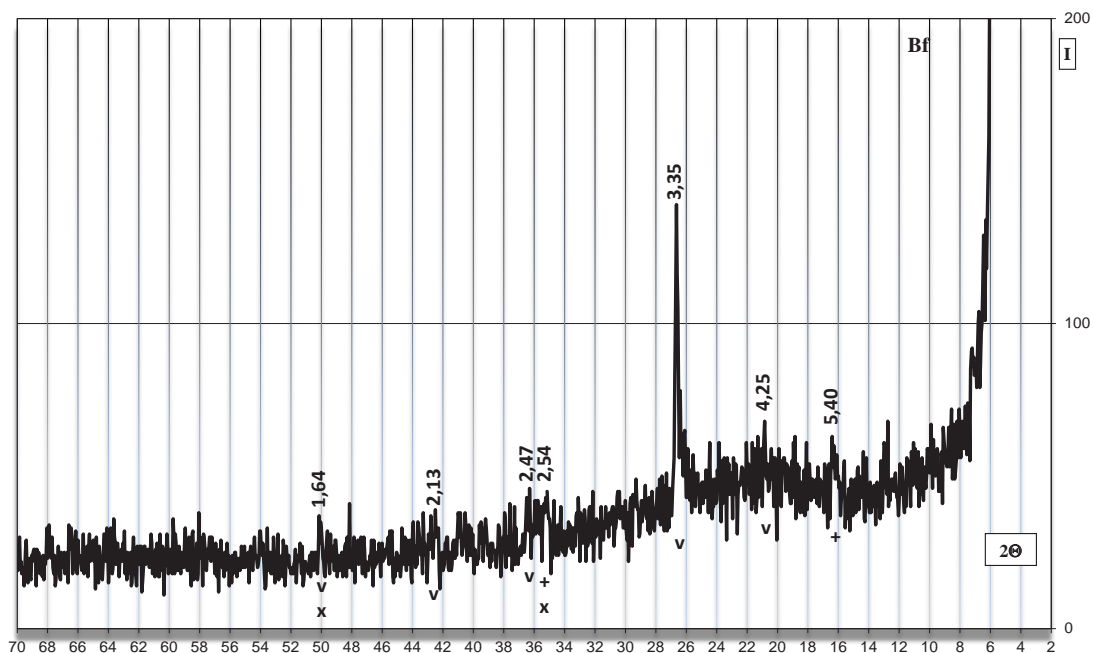


Fig. 1. Diffractogram of fly ash from Burshtynska TPP: v-quartz, +-mullite, x-haematite

Table 3

Characteristics of the pore structure of composite materials of the waterdispersion – ash system

Dispersion mark	Ash concentration, C, wt. %	Indicators			
		Water absorption after 24 h, %	Open porosity, %	Total porosity, %	Averagedensity, g/cm ³
Policril 590	65	4,2	6,03	18,04	1,44
	75	4,6	7,07	21,19	1,54
	85	7,8	12,50	21,74	1,56
	90	10,3	16,23	22,06	1,57
Latex 2012	65	7,2	9,17	13,74	1,28
	75	7,3	11,61	17,17	1,52
	85	8,5	12,90	18,21	1,59
	90	10,9	18,40	22,62	1,68

The analysis of the mineralogical composition of the studied ash showed that the sample of fly ash from Burshtynska TPP is characterised by the presence of glassy phase and crystalline phases of quartz, hematite, and mullite (Fig. 1).

Experimental part. The studied compositions provided for a high concentration of fly ash as a filler from 65 to 90 wt. % (Table 3).

It has been established that the obtained compositions differ in the characteristics of the pore structure, evaluated by physical and mechanical parameters, with obvious differences related to the type of polymeric binder used.

Thus, the indicators of water absorption and open porosity reach a minimum at an ash concentration of 65 wt. %, but differ quantitatively depending on the type of polymer binder. These indicators for the system with Latex 2012 are 7.2 % and 9.17 %,

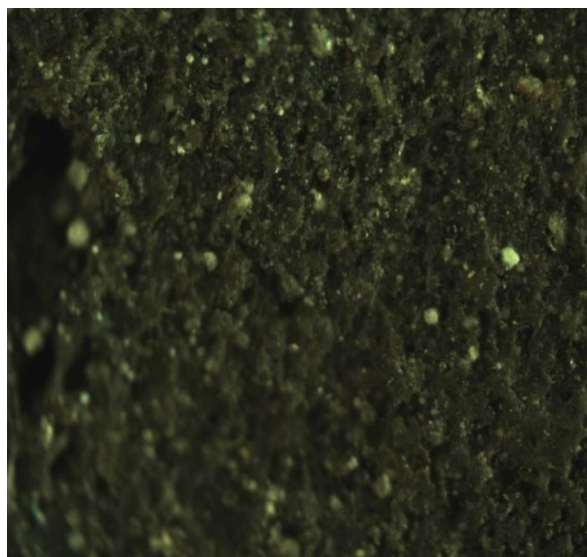
respectively, and for the system with Policril 590, 4.2 % and 6.03 %, respectively.

In the same range of changes in filler concentrations C = 65–90 wt. % when using Latex 2012 in comparison with Policril 590, the total porosity values are 13.74–22.62 % vs. 18.04–22.06 %.

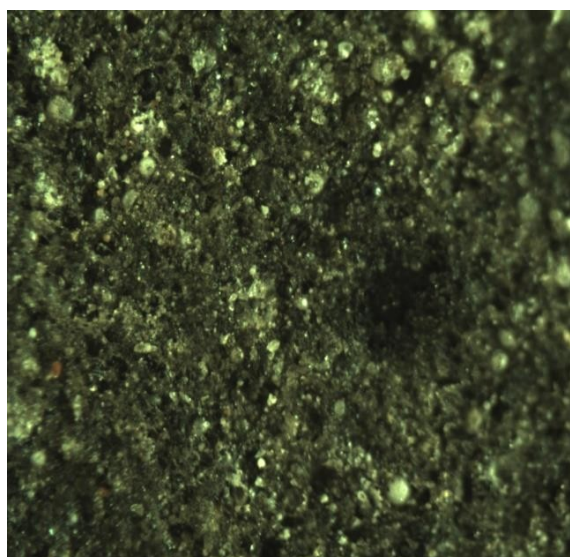
The results of optical microscopy were a clear confirmation of these features of the pore structure of composites based on the studied systems (Fig. 2).

An important stage of the work was the analysis of the energy state of the surface of the filler particles as a factor in the degree of interaction with different types of polymer binder.

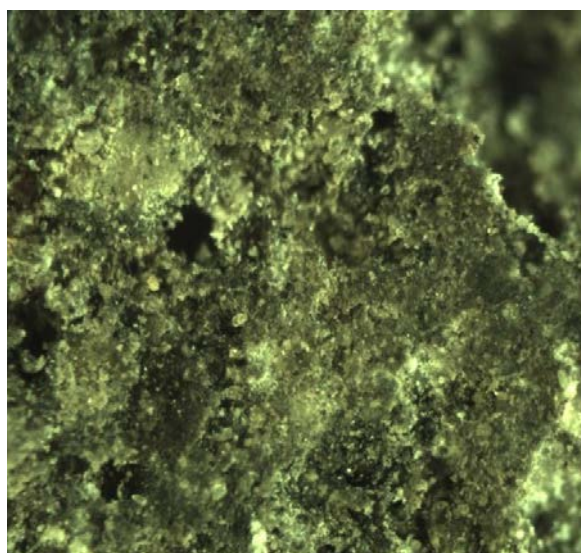
When studying the structure of composites according to the modified de Boer classification, the nitrogen sorption isotherms (Fig. 3) on the materials under study belong to type II (b) isotherms [16].



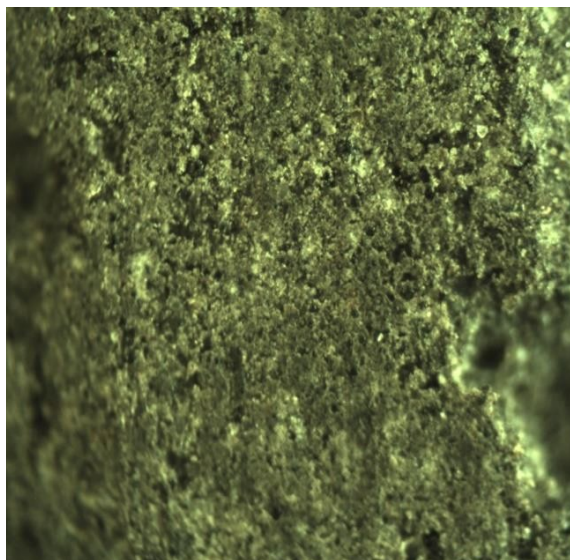
Ash 65 % + Policril 590



Ash 85 % + Policril 590

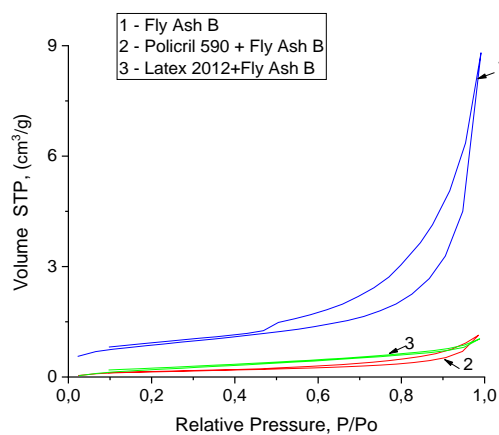


Ash 65 % + Latex 2012



Ash 85 % + Latex 2012

Fig. 2. Optical analysis of the pore structure of composites

Fig. 3. Adsorption-desorption isotherms of N₂ of 1 – Fly Ash B, 2 – Policril 590 + Fly Ash B, 3 – Latex 2012+Fly Ash B

The narrow hysteresis loop on the isotherms is caused by capillary condensation in the ash structural elements. In addition, the narrow hysteresis indicates the presence of micropores. The calculated parameters of the porous structure of the samples are given in Table 4.

Thus, the particles of the filler – fly ash with a developed surface intensively interact with the matrix – Policril 590. This is confirmed by a 5-fold decrease in the specific surface area of the particles of the composition of ash + Policril 590 compared to the original ash.

When using the copolymer Latex 2012, the specific surface area of the composite particles decreased by 1.2 times.

The results of infrared spectroscopy correlate with the above data. When analysing the interaction

Characteristics of the porous structure

Samples	BET specific surface, m/g ²	Total porevolume at P/P ₀ =up to 1, cm ³ /g ³	Micropore volume see/g ³	Average pore size, nm
Ash	3,10	13,6*10 ⁻³	1,56*10 ⁻⁴	8,79
Ash + Policril 590	0,80	1,76*10 ⁻³	4,52*10 ⁻⁴	4,39
Ash + Latex 2012	2,64	1,61*10 ⁻³	3,54*10 ⁻⁴	1,21

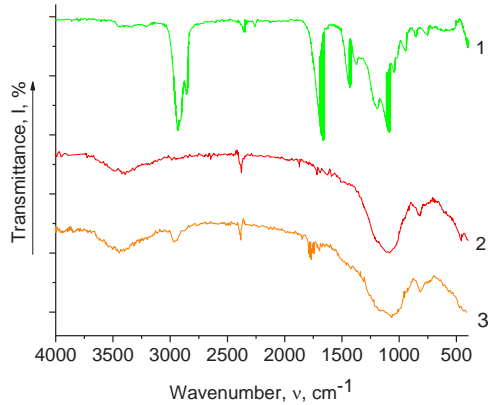


Fig. 4. a. Infrared spectroscopy of samples: 1 – Policril 590, 2 – Ash, 3 – Ash + Policril 590

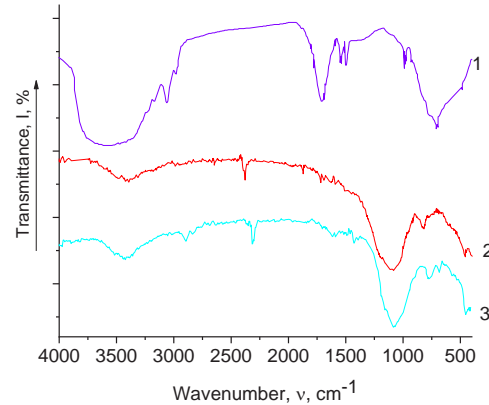


Fig. 4. b. Infrared spectroscopy of the samples: 1 – Latex 2012, 2 – Ash; 3 – Ash + Latex 2012

between the filler and the binder (Fig. 4. a, curve 1), it was found that the acrylic dispersion of Policril 590 has an absorption band at 1670 cm⁻¹, which corresponds to the monomeric links of acrylate [17]. This band is the result of asymmetric and symmetric valence vibrations of C=O in the carboxyl group. The absorption band at 1435 cm⁻¹ reflects the vibrational vibration of the C=C bond, and the bands at 1100 cm⁻¹ indicate the presence of the CH bond [18].

In the Policril 590-Ash system (Fig. 4. a, curve 3), changes in the curve are observed, indicating the interaction between the components. The formation of a small absorption band at 2250 cm⁻¹, corresponding to the C=C bond, and at 1720 cm⁻¹, characteristic of the C=O bond of the polymer, in addition to their slight displacement, indicates the interaction of the Policril 590-Ash system.

Regarding the IR spectrum of the styrene-butadiene dispersion Latex 2012 (Fig. 4. b, curve 1), the saturation band at 2980 cm⁻¹ corresponds to the CH bond in the aromatic ring, and the saturation band at 1525 cm⁻¹ indicates the presence of the ring itself. The absorption bands at 2852 cm⁻¹ and 1500 cm⁻¹ indicate the presence of the CH₂ group and the styrene double bond [19].

For the composite material based on the Latex 2012-Ash system (Fig. 4. b, curve 3), a decrease in the intensity of the peak at 2980 cm⁻¹ with its shift to 2910 cm⁻¹ and the disappearance of the peak at 1720 cm⁻¹

was detected. These changes indicate an intermolecular interaction between the styrene-butadiene dispersion and the ash from Burshtynska TPP.

The revealed structural features of the studied composites result in significant changes in their mechanical properties. Thus, in particular, when determining the Young's modulus associated with the elasticity characteristics of the material (Fig. 5), a significant effect of the polymer matrix on the properties of PCM can be observed.

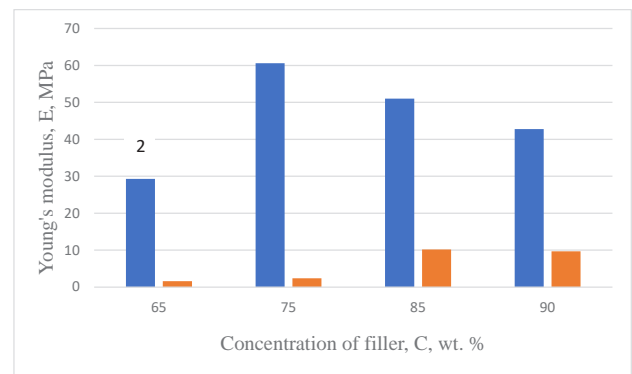


Fig. 5. Dependence of Young's Modulus on ash concentration for the systems: Ash + Policril 590 (1), Ash + Latex 2012 (2)

As can be seen, PCMs based on styrene-butadiene aqueous dispersion are characterised by significantly higher strength values. Their Young's modulus ranges from 29.3–60.6 MPa compared to 1.6–10.2 MPa for acrylic dispersion.

The analysis of the obtained characteristics of the mechanical properties of the experimental composites determines their possible scope of practical use.

Conclusions:

1. The use of thermal power waste as a filler is a promising area for expanding the raw material base for the production of polymer composites.

2. In the development of new composites with a high content of fly ash from thermal power plants, it is important to take into account the peculiarities of

their composition and the energy state of the surface as a factor of interaction with different types of polymer matrix.

3. The test results indicate the possibility of adjusting the properties of polymer composites by varying the types and concentration of the polymer matrix. It is noted that the range of changes in property indicators includes: water absorption from 4.2 % to 10.9 %, open porosity 6.03–18.40 %, Young's modulus from 1.6 MPa to 60.6 MPa.

Bibliography:

1. Landel R.F., Nielsen L.E. Mechanical properties of polymers and composites. In CRC Press eBooks, 1993. 580 p. <https://doi.org/10.1201/b16929>.
2. Melnyk L.I., Chernyak L.P., Svidersky V.A., Belousov O.Yu., Nehreyko A.V. Structure and properties of polymer composite based on natural zeolite. *French-ukrainian journal of chemistry*, 2020. № 8. P. 12–18. <https://doi.org/10.17721/fujcV8I1P12-18>.
3. Haluschak M.O., Ralchenko V.G., Tkachuk A.I., Freik D.M. Methods of Measuring the Thermal Conductivity of Bulk Solids and Thin Films (Review). *Physics and Chemistry of Solid State*, 2013. Vol. 14. № 2. P. 317–344.
4. Demchenko V., Simyachko O., Svidersky V. Research of mineralogical composition, structure and properties of the surface of Ukrainian ash microspheres. *Technology Audit and Production Reserves*. 2017. Vol. 6. № 1(38). P. 28–34. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.118958>.
5. Кашковський В.І., Євдокименко В.О., Каменських Д.С., Ткаченко Т.В., Вахрін В.В. Зольні та золошлакові відходи як багатофункціональна сировина. *Наука та інновації*. 2017. № 13(4). С. 54–63. <https://doi.org/10.15407/scin13.03.054>.
6. Дворкін Л. Й. Ефективні зольні цементи, бетони та розчини: монографія. Рівне: НУВГП, 2022. 419 с.
7. Перков Е., Перкова Т. Утилізація золи-виносу Придніпровської ТЕС. *Mining of Mineral Deposits*, 2017. № 11(1). С. 106–112. <https://doi.org/10.15407/mining11.01.106>.
8. Hadbaatar A., Mashkin N.A., Stenina N.G. Study of Ash-Slag Wastes of Electric Power Plants of Mongolia Applied to their Utilization in Road Construction. *Procedia Engineering*, 2016. Vol. 150. P. 1558–1562. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.111>.
9. Яцишин А.В., Матвєєва І.В., Ковач В.О., Артемчук В.О., Каменева І.П. Особливості впливу золовідвалів підприємств теплоенергетики на навколишнє середовище. *Проблеми надзвичайних ситуацій*, 2018. № 2 (28). С. 57–68. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2594489>.
10. Mironyuk I.F., Tatarchuk T.R., Vasylyeva H.V., Yaremiy I.P., Mykytyn I.M. Morphology, Phase Composition and Radiological Properties of Fly Ash Obtained from the Burshtyn Thermal Power Plant. *Physics and chemistry of solid state*, 2019. V. 19, № 2. P. 171–178.
11. Костюкова Є., Барахтенко В.В. Суміші полімерних відходів і летючої золи для виробництва штучної деревини. *Всесвітня екологічна конференція з пластмас*. Орlando, Флоридa, США, 2010. С. 74–82.
12. Мельниченко М. А., Єршова О. В., Чупрова Л. В. Вплив складу наповнювача на властивості полімерних композиційних матеріалів. *Молодий вчений*. 2015. № 96(16). С. 199–202.
13. Водно-дисперсійна теплоізоляційна композиція: пат. 122837 України: МПК C09D4/02, C09D5/00, C09D 5/02. № 201902367; заявл. 11.03.2019; опубл. 06.01.21, Бюл. № 1. 3 с.
14. Brunauer S, Emmett P.H., Teller E. Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American chemical society*, 1938. № 60(2). P. 309–19. <https://doi.org/10.1021/ja01269a023>.
15. 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. № 67(5-6). P. 1168–1172. <https://doi.org/10.1016/j.jpcc.2006.01.042>.
16. Kuila U., Prasad M. Specific surface area and poresize distribution in clays and shales. *Geophysical Prospecting*, 2013. Vol. 61, № 2, 341–362. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12028>.
17. Fischer E., Cuccato D., Storti G., Morbidelli M. Effect of the charge interactions on the composition behavior of acrylamide/acrylic acid copolymerization in aqueous medium. *European Polymer Journal*, 2018. Vol. 98. P. 302–312, <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.11.022>.
18. Crompton TR. Practical Polymer Analysis. New York: Springer. 1993. 822 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2874-6>

19. Guo T., Song J., Jin Y., Sun Z., Li L. Thermally stable and green cellulose-based composites reinforced by styrene-co-acrylate latex for lithium-ion battery separators. *Carbohydrate Polymers*, 2019. Vol. 206, P. 801–810. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.025>

Мельник Л.І., Черняк Л.П., Євпак В.В. КОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ ЗОЛИ ВІНОСУ З РІЗНОВИДАМИ ПОЛІМЕРНОЇ МАТРИЦІ

Під час виробництва електроенергії на Буришинській ТЕС, в результаті спалювання вугілля, утворюються значні обсяги золи, що накопичуються та становлять приблизно 40 мільйонів тон. Одним з перспективних напрямків утилізації цієї золи є її використання у виробництві полімерних композиційних матеріалів (ПКМ). Ключовим аспектом у цьому процесі є вибір полімерного зв'язуючого як матриці, що визначає основні характеристики ПКМ, такі як міцність, жорсткість, термічна та хімічна стійкість та інші.

Поєднання золи та полімерної матриці призводить до створення матеріалу, що відрізняється покращеними механічними та термічними характеристиками порівняно з традиційними матеріалами. Зольний компонент забезпечує термостійкість композиту, в той час як полімерна матриця додає гнучкість і довговічність.

Використання традиційних пластичних мас при створенні композитів призводить до збільшення енергоємності виробництва ПКМ через значне споживання теплової енергії для переведення полімеру в розплав для оптимізації процесу змішування. Тому нами запропоновано використовувати полімерну матрицю у вигляді водних дисперсій полімерів при розробці композиційних матеріалів. Це спрощує та здешевлює технологію виробництва полімерних композиційних матеріалів.

Запропоновано технологію виробництва полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), що включає кілька етапів: механоактивацію наповнювача та полімерної матриці, формування заготовок та їх висушування, термообробку заготовок з наступним холодним пресуванням.

Вивчено процес формування структури композиту та особливості взаємодії в системі зола-полімерна матриця. Проведено оцінку впливу різних типів полімерного зв'язуючого на формування пористої структури та фізико-механічних характеристик композитів при високій концентрації наповнювача. Демонстровано можливість регулювання властивостей композитів в широкому діапазоні: водопоглинання від 4,2% до 10,9%, відкрита пористість від 6,03% до 18,40%, модуль Юнга від 1,6 МПа до 60,6 МПа.

Ключові слова: композит, наповнювач, зола виносу, латекс, склад, структура, фізико-механічні властивості.

УДК 661:606
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/19>

Мініна Ю.О.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Мініна Н.Б.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Третьяков А.О.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ БІОДЕГРАДАЦІЇ ПОЛІМЕР-ПОЛІМЕРНИХ СУМІШЕЙ В ПРОЦЕСІ ВЕРМІКУЛЬТИВУВАННЯ

Стаття присвячена дослідженню біопереробки полімерних відходів, що є актуальним у наш час і вимагає уважного розгляду та найшвидшого вирішення. У роботі розглядаються композиційні матеріали, а саме полімер-полімерні суміші, що складаються з природного та синтетичного полімеру. В якості природного полімеру використовується пластифікований кукурудзяний крохмаль. Він є повноцінним полімером, тобто здатен переходити у в'язкотекучий стан та може бути перероблений стандартними методами переробки синтетичних полімерів. Крохмаль та синтетичний полімер при суміщенні утворюють взаємопроникну сітчасту структуру. Створені композиційні матеріали, які містять від 95 до 90 % полісахариду і тільки 5 – 10 % синтетичного полімеру та забезпечують підвищення технологічних властивостей і здатність до біодеградації. В якості синтетичної матриці використовували сополімер етилену з вінілацетатом (EVA) та хлорований поліетилен (CPE).

Для оцінки здатності до біодеструкції полімер-полімерних сумішей на основі полісахаридів використовували такі методи дослідження, як штурм-тест ASTM 5209-91 та тестування у біогумусі. На основі проведених досліджень встановлено перспективність полімерних композитів, які здатні до біорозкладу, а також композитів, які в основному складаються з відновлюваної сировини рослинного походження. Метою роботи є розгляд проблеми надходження та накопичення відходів полімерних виробів, дослідження впливу мікроорганізмів вермікомпосту на біостійкість композиційних матеріалів.

Наразі немає методики утилізації з гарантованим біологічним розкладом, тому актуальним є вивчення умов біодеградації полімер-полімерних сумішей біологічними об'єктами, цей процес не вимагає енерго та трудовитрат і не виключає забруднення навколишнього середовища.

Ключові слова: полімери, відходи, утилізація відходів, біодеградація, сополімер етилену з вінілацетатом, хлорований поліетилен, вермікультивування.

Постановка проблеми. З початку 20 ст. використання синтетичних полімерів розвивалось бурхливими темпами, завдяки комбінації їх властивостей, а саме технологічності переробки в виробі комплексу високих експлуатаційних властивостей та довговічності. Але вже у 21 ст. їх плюси почали обернутися в негативні моменти, а саме постала проблема утилізації виробів синтетичних полімерів. Висока біостійкість полімерних відходів є глобальною проблемою у забрудненні довкілля [1]. Відомо, що біорозкладання полімерів залежить від хімічної структури матеріалу та може тривати понад сто п'ятдесят років, при цьому величезна кількість шкідливих елементів забруднює ґрунти, водойми та повітря [2]. Новітні розробки сумішей полімерних композитів містять синтетичний полімер, в об'єм якого введено при-

родний полімер або відходи сільськогосподарської та харчової промисловості. Проте їх утилізація не має чіткого опису процесу з гарантованим біологічним розкладом. Тому актуальним є вивчення умов біодеградації полімер-полімерних сумішей методом вермікультивування.

Біорозкладні пластики можна назвати «наступним кроком» у розвитку полімерних матеріалів. Потреби ринка які формуються через екологічну ситуацію, економічні аспекти у нафтопереробці – стимулюють до розробок та запровадження матеріалів, що відповідають наступним критеріям:

- можливість переробки на стандартному обладнанні для синтетичних тонажних полімерів;
- незалежність від нафтохімічної сировини;
- контрольована безпечна деградація у певних умовах при утилізації.

Під умовами утилізації мається на увазі: певна температура, вологість, наявність або відсутність УФ-випромінення, а також наявність бактерій та мікроорганізмів [3].

За походженням біорозкладні полімери можна умовно поділити на три групи [4]:

- природні полімери, або композиційні матеріали на їх основі;
- полімери, структура яких подібна до природних, тому вони здатні до біорозпаду;
- синтетичні полімери, які завдяки модифікації здатні до біорозпаду.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Незважаючи на те, що зараз на ринку біорозкладних матеріалів існує різноманітна продукція думки відносно здатності полімерів до біорозкладу і оцінка цієї властивості досить суперечливі [5].

Розроблене маркування біорозкладних матеріалів та затверджені стандарти випробувань.

DIN 54900 «Перевірка полімерів на здатність до компостування». Тест показує, чи може полімерний матеріал за умови контрольованого компостування бути біологічно розкладений або перетворений у складові компосту. Стандарт заснований на ідеї багатоступеневої схеми тестування та розділений на три частини.

1. DIN 54900-1 «Хімічна перевірка полімерів». Матеріали вважаються непридатними, якщо масова частина всіх органічних компонентів не перевищує 50%. Вміст потенційно шкідливих речовин має бути на такому низькому рівні, щоб це не перешкоджало переробці компосту.

2. DIN 54900-2 «Перевірка на повну біологічну розкладність полімерів у лабораторному досліді». Можна стверджувати про однозначне розкладання, якщо мінімум 60% органічного вуглецю переробляється протягом максимум 6 місяців.

3. DIN 54900-3 «Випробування в практичних умовах».

Досліджуваний матеріал повинен піддаватися тестуванню за вищеписаними методиками за умов, близьких до практики. Тест проводиться в біокомпості за методикою, що передбачає провітрювання та перелопачування. Зразки змішуються зі свіжими відходами і поміщаються в мішки. Вміст мішків регулярно аналізують, спочатку просіюють на 10-міліметрових ситах, потім на ситах з отворами від 10 до 5 і зрештою менше 2 мм. При цьому відсортовують і перевіряють частини біорозкладного матеріалу, що залишилися. Відсортовані частинки висушують, зважують і визначають частку органіки за допомогою про-

жарювання, при цьому може бути визначена максимальна товщина матеріалу, що розкладається.

Також для визначення здатності до біорозкладу проводять випробування в природних умовах. Згідно зі стандартами (D 3083 і D 5247-92), що регламентують методи визначення фізико-механічних властивостей (молекулярної маси, міцності і подовження) матеріалів, що зразки експонувались в ґрунті впродовж 90 днів, дозволяють комплексно досліджувати здатність полімерних матеріалів до біорозкладання.

Натурні методи, незважаючи на їх тривалість і трудомісткість, дозволяють отримати найбільш достовірні дані про кінетику і механізм біодеструкції полімерних матеріалів, оскільки в цьому випадку умови випробувань максимально наближені до реальних умов утилізації твердих полімерних відходів [6, 7]. Складність інтерпретації результатів натурних випробувань полягає в тому, що в природному середовищі відбувається безперервна зміна її хімічного і мікробіологічного складу, температури, вологості, кислотності, умов аерування і т. п.

Існує широкий спектр лабораторних і натурних методів дослідження біорозкладності, які мають різні тривалість, рівень регламентації, умови проведення випробувань і визначення показників. Найбільш продуктивним, слід рахувати комплексний підхід до вивчення біодеструкції полімерних матеріалів. Для визначення достовірних кінетичних параметрів і з'ясування механізму цього процесу потрібний порівняльний аналіз результатів ряду незалежних фізико-хімічних, біохімічних, мікробіологічних експериментів, що реалізуються як в лабораторних, так і в природних умовах [8].

Постановка завдання. На стійкість біополімерної композиції до біологічного розкладання впливають великі макроструктурні характеристики (величина пористості, рівномірність розподілу домішок у полімерній масі, особливості обробки поверхні виробів тощо), а також технологічні параметри виготовлення матеріалу та його переробки у вироби. Метою новітніх розробок у галузі створення біорозкладних пластмас є встановлення загальних закономірностей у підборі компонентів і технологічних параметрів при виготовленні матеріалів, що поєднують високий рівень експлуатаційних характеристик (міцність, екологічну безпеку, та ін.).

Виклад основного матеріалу. Для оцінки здатності до біодеструкції полімер-полімерних сумішей на основі полісахаридів використовували наступні методи дослідження: штурм-тест

ASTM 5209-91; тестування у біогумусі. В основі методу штурм-тесту лежить вимірювання швидкості асиміляції досліджуваного матеріалу у водному розчині у присутності бактеріальної мікрофлори, що реєструється за швидкістю виділення вуглекислого газу в результаті життєдіяльності мікроорганізмів. По зміні обсягу HCl яка пішла на титрування судили про кількість CO₂, що виділився. Для дослідження методом лиття під тиском були отримані зразки для випробування механічних властивостей, таких як міцність при розтягу. Цікаво було дослідити не тільки виділення вуглекислого газу, а як зміняться механічні властивості матеріалу під дією біодергації.

На рисунку 1 приведена кінетична крива зміни індексу біорозкладу для полімер-полімерної суміші EVA-крохмаль, на рисунку 2 для суміші SPE-крохмаль.

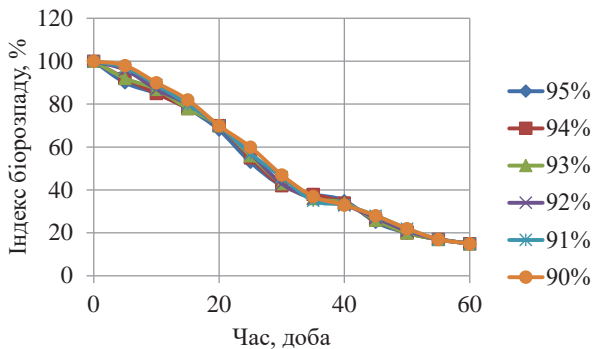


Рис. 1. Кінетична крива зміни індексу біорозкладу для полімер-полімерної суміші EVA-крохмаль

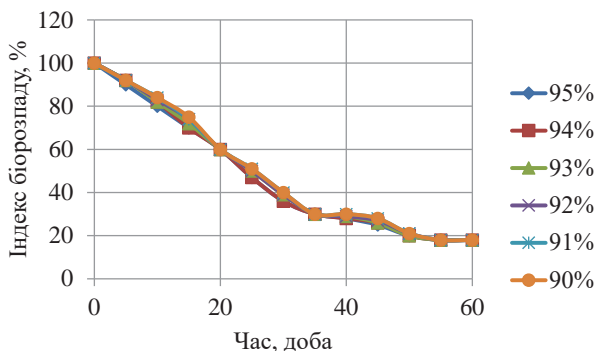


Рис. 2. Кінетична крива зміни індексу біорозкладу для полімер-полімерної суміші SPE-крохмаль

Згідно графічних залежностей на рисунках 1 і 2 можна простежити чітку залежність, згідно якої для біорозпаду матеріалу потрібно в середньому 40 діб. За цей проміжок часу індекс біорозпаду знижується до 30–35%. Можна сказати, що найбільш інтенсивне виділення вуглекислого газу спостерігається впродовж перших 30 діб.

Цікавим було дослідити зміни, які відбулися в механічних властивостях зразків впродовж випробувань. Досліджувані зразки піддавали механічним випробуванням через певні проміжки часу. Ці залежності зміни механічних властивостей від часу витримки у водних розчинах з бактеріальною мікрофлорою приведені на рисунках 3 і 4 для полімер-полімерної суміші EVA-крохмаль та суміші SPE-крохмаль.

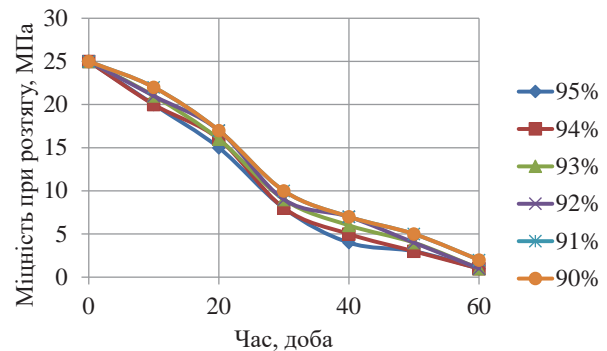


Рис. 3. Залежність зміни механічних властивостей від часу витримки у водних розчинах з бактеріальною мікрофлорою для полімер-полімерної суміші EVA-крохмаль

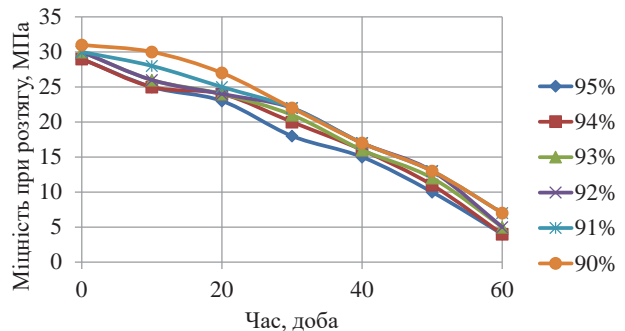


Рис. 4. Залежність зміни механічних властивостей від часу витримки у водних розчинах з бактеріальною мікрофлорою для полімер-полімерної суміші SPE-крохмаль

Зважаючи, що полімерні композиції, які піддавалися випробуванням переважно склалися з пластифікованого крохмалю можна зробити висновок: їх загальна біодеструкція – це властивість, яка відноситься до крохмалю, швидкість, з якою відбуваються ці процеси обумовлена концентрацією і якістю суміщення крохмалю з синтетичним полімером.

Щоб підтвердити цей висновок було досліджено біодеструкцію пластифікованого крохмалю. З нього вдалося отримати тільки зразки для випробувань за методом штурм-тесту. Окрім того, механічні властивості таких зразків дуже низькі, тому не було сенсу проводити дослідження щодо їх зниження впродовж випробувань.

На рисунку 5 показана залежність біорозпаду пластифікованого крохмалю від часу. В порівнянні з композитом процес біорозпаду проходить практично в два рази швидше. Це доводить, що навіть невелика кількість синтетичного полімеру, який добре диспергований в полімер-полімерній суміші значно уповільнює процес біодеградації.

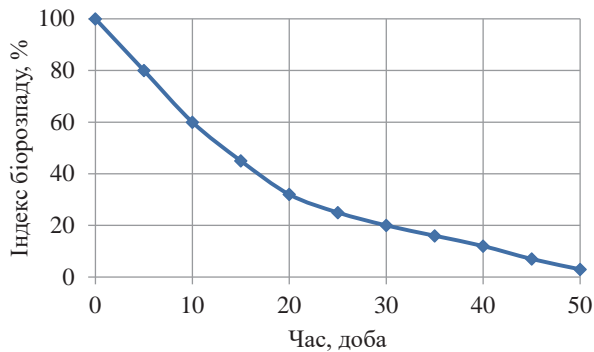


Рис. 5. Залежність біорозпаду пластифікованого крохмалю від часу

З біополімерів виготовляють різноманітні вироби. Переважно це упаковки, як жорстке, так і гнучке. Дослідження біорозкладу жорсткого, «товстостінного» упаковки було проведено вище. Для тестування у біогумусі було виготовлено «тонкі» плівки. За технологічних умов переробки полімер-полімерних сумішей на основі полісахариду стандартними методами переробки можна отримувати плівки товщиною в середньому 50 мкм. Саме такі плівки було досліджено. Зразки плівок було покладено у лоток з ферментованим субстратом на основі модифікованого соняшникового лушпиння у повітропроникних ємностях обсягом 2 дм³ при температурі 23⁰С та вологості 60%, рН 6,8÷7,5. Ступінь деградації досліджували візуально та за зміною фізико-механічних властивостей. Розрахунок ступеня деградації проводили за формулою:

$$\Delta = \frac{a_1 - a_0}{a_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

де a_1 – властивість (наприклад, міцність при розтягу) до компостування;

a_0 – властивість після компостування.

У випадку з дослідженням розкладання плівок у біогумусі час їх розпаду складав в середньому 30 (норм) діб. Після цього часу дослідити ступінь деградації було неможливо, тому що плівки повністю втрачали міцність та розпадалися на частки. На рисунку 6 показана залежність ступеня деградації від часу. Зважаючи на те, що кінетика деградації тонких плівок була практично ідентична для концентрації синтетич-

ного полімеру від 5 до 10%, на малюнку показане середнє значення.

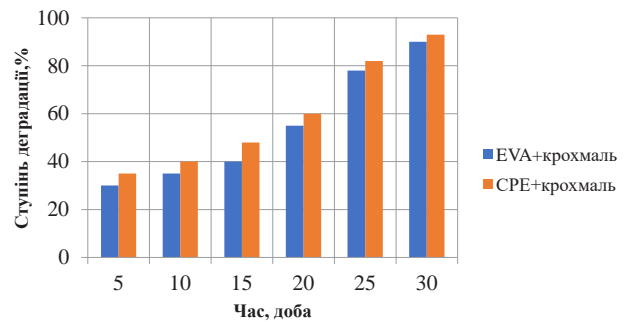


Рис. 6. Залежність ступеня деградації полімерної композиції від часу

Отже, дані випробувань показують, що за стандартом DIN 54900 розроблені композиційні матеріали здатні до компостування: вони проходять «Хімічну перевірку полімерів», «Перевірку на повну біологічну розкладність полімерів у лабораторному досліді» згідно з випробуванням за методом штурм-тесту та «Випробування в практичних умовах» згідно тестування у біогумусі.

Висновки. На основі проведених досліджень здатності до біодеградації полімер-полімерних сумішей на основі пластифікованого кукурудзяного крохмалю з синтетичними полімерами встановлено:

1. Перспективність полімерних композитів, які здатні до біорозкладу, а також композитів, які в основному складаються з відновлюваної сировини рослинного походження.

2. Для біорозпаду матеріалу потрібно в середньому 40 діб. За цей проміжок часу індекс біорозпаду знижується до 30–35%. Тобто, найбільш інтенсивне виділення вуглекислого газу відбувалось впродовж перших 30 діб.

3. За стандартом DIN 54900 розроблені композиційні матеріали здатні до компостування: вони проходять «Хімічну перевірку полімерів», «Перевірку на повну біологічну розкладність полімерів у лабораторному досліді» згідно з випробуванням за Штурм методом та «Випробування в практичних умовах» згідно тестування у біогумусі.

4. Навіть невелика кількість синтетичного полімеру, добре диспергованого в полімер-полімерній суміші значно уповільнює процес біодеградації.

5. Полімерні композиції, які піддавалися випробуванням переважно складалися з пластифікованого крохмалю, тому швидкість процесу розкладу, обумовлена концентрацією і якістю суміщення крохмалю з синтетичним полімером.

Список літератури:

1. Боечко Ф.Ф. Основы химии полимерів/ Ф.Ф. Боечко. К.:Рад. шк., 1988. 198 с.
2. Скляр А.М. Вступ до хімії полімерів./А.М. Скляр. Суми. 2010. 80 с.
3. Evan J., Sikdar S. Biodegradable plastic. An idea whose time has come. Chemtech. 2012. P. 38–42.
4. Wang Xiu Li, Yang Ke-Ke, Wang Yu – Zhong. Properties of starch blends with biodegradable polymers // I. Macromol. Sci. C. – 2003. № 36. p. 385–409.
5. Cross Richard A. Kalra Bhanu Biodegradable polymers for the environment Science. 2002. 297, № 5582б. – p. 803–807.
6. Grandall L. Bioplastics: A burgeoning industry INFORM: Int. News Fats, Oils and Relat. Mater. – 2002. № 8. p. 626–627, 629–630.
7. Stevens Eugene S., Poliks Mark D. Tensile strength measurements on biopolymer films // J. Chem.educ. – 2003. № 7. p. 810–812.
8. Ситар В.І., Сухий К.М., Мітіна Н.Б., Гармаш С.М., Лисиченко Б.О. Створення біодеградуючих композиційних матеріалів на основі полівінілового спирту // Питання хімії та хімічної технології. 2020. № 1. С. 86–91 (Index Scopus)

Minina Yu.O., Mitina N.B., Tretyakoff A.O. STUDY OF THE CONDITIONS OF BIODEGRADATION OF POLYMER-POLYMER MIXTURES IN THE PROCESS OF VERMICULTURE

The article is devoted to the study of polymer waste bioprocessing, which is relevant today and requires careful consideration and prompt resolution. The paper deals with composite materials, namely polymer-polymer blends consisting of natural and synthetic polymers. Plasticized corn starch is used as a natural polymer. It is a full-fledged polymer; i.e., it is capable of transitioning to a viscous state and can be processed using standard methods of processing synthetic polymers. When combined, starch and synthetic polymer form an interpenetrating mesh structure. Composite materials containing 95 to 90 % polysaccharide and only 5 to 10 % synthetic polymer have been created, which provide improved technological properties and biodegradability. Ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) and chlorinated polyethylene (CPE) were used as synthetic matrix. To evaluate the biodegradability of polymer-polymer blends based on polysaccharides, we used such research methods as the ASTM 5209-91 assault test and vermicompost testing. Based on the research, the prospects of biodegradable polymer composites, as well as composites mainly consisting of renewable raw materials of plant origin, have been established. The aim of the work is to consider the problem of waste polymer products and their accumulation, to study the influence of vermicompost microorganisms on the biodegradability of composite materials. Currently, there is no method of utilization with guaranteed biodegradation, so it is important to study the conditions of biodegradation of polymer-polymer mixtures by biological objects, this process does not require energy and labor costs and does not exclude environmental pollution.

Key words: polymers, waste, waste utilization, biodegradation, copolymer of ethylene with vinyl acetate, chlorinated polyethylene, vermiculture.

Фролова Л.А.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Нікітін М.О.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Родін Д.О.

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

СТРУКТУРНІ, ОПТИЧНІ ТА МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОДИСПЕРСНИХ ФЕРИТІВ $Mn_xCo_yZn_{1-x-y}Fe_2O_4$ (ДЕ $0 < x < 1$ ТА $0 < y < 1$)

Нанокристалічні феритні матеріали привертають значний інтерес дослідників завдяки своїм унікальним властивостям, що обумовлюють вивчення цих об'єктів в різних областях науки, включаючи фізику, хімію, біологію, медицину, матеріалознавство та інженерію. Саме феритні наноматеріали володіють підвищеною реакційною здатністю, специфічними оптичними, електричними і магнітними властивостями. Особливістю таких матеріалів є те, що основними факторами, які визначають їх властивості є структура, морфологічні особливості, розмір частинок. Крім того, властивості можна регулювати змінюючи хімічний склад. В даній роботі синтезовані композиційні ферити $Mn_xCo_yZn_{1-x-y}Fe_2O_4$ (де $0 < x < 1$ та $0 < y < 1$) плазмовим методом. Для характеристики отриманих зразків було використано рентгенофазовий аналіз, вібраційну магнітометрію спектроскопічний аналіз. Для вивчення впливу катіонного складу на властивості феритів було використано симплекс-решітчастий план, який вимагає мінімальної кількості експериментів. Функціями відгуку були обрані коерцитивна сила, намагніченість насичення, параметр решітки, коефіцієнт магнітокристалічної анізотропії, коефіцієнт прямокутності петлі гістерезису, остаточно намагніченість, ширина забороненої зони, розмір кристаліту, ступінь мікронапруг. Встановлено, що отримані наночастинки феритів мають шпінельну структуру. Зміна параметру решітки відбувається в залежності від радіуса катіона металу та розташування іонів по підрешіткам. Мінімальні значення параметру решітки та максимальні коефіцієнту магнітокристалічної анізотропії, намагніченості насичення та коерцитивної сили відповідають подвійним складам Mn-Co феритів. Синтезовані наноферити мають енергію забороненої зони 1,55–1,9 еВ. Встановлено, що $Zn_{1-x}Co_xFe_2O_4$ ферити та $Zn_{1-x}Co_xMn_{0.5}Fe_2O_4$ ($0 < x < 1$) можуть використовуватися для синтезу композиційних матеріалів.

Ключові слова: ферити, намагніченість насичення, коерцитивна сила, параметр решітки, магнітокристалічна анізотропія, коефіцієнт прямокутності.

Постановка проблеми. Нанокристалічні феритні матеріали привертають значний інтерес дослідників завдяки своїм унікальним властивостям, що обумовлюють вивчення цих об'єктів в різних областях науки, включаючи фізику, хімію, біологію, медицину, матеріалознавство та інженерію. Саме феритні наноматеріали володіють підвищеною реакційною здатністю, специфічними оптичними, електричними і магнітними властивостями [1]. Особливістю таких матеріалів є те, що основними факторами, які визначають їх властивості є структура, морфологічні особливості, розмір частинок. Крім того, властивості можна також регулювати змінюючи хімічний склад.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед різноманітних феритів 3d-металів нанороз-

мірні ферити $CoFe_2O_4$, $NiFe_2O_4$, $CuFe_2O_4$, $MnFe_2O_4$, $ZnFe_2O_4$ досліджуються впродовж багатьох років завдяки структурним, оптичним, магнітним, електричним та діелектричним властивостям та широкої області застосування у фотокаталізі, сенсорах, постійних магнітах, магнітних рідинах, мікрохвильових поглиначах, для знезараженні води, в якості кольорових пігментів, у захисті від корозії [2].

Наприклад, ферит марганцю кубічної сингонії має структуру частково оберненої шпінелі, причому 20% іонів Mn^{2+} розташовані в октаедричних позиціях і 80% розташовані у тетраедричних позиціях, що зумовлює високі магнітні характеристики [3]. Нанодисперсний ферит мангану характеризується контрольованим розміром, високим значенням намагніченості насичення,

суперпарамагнітною природою, термостійкістю, корозійною стійкістю.

Ферит кобальту має обернену структуру шпінелі з іонами Co^{2+} , що розташовані переважно в октаедричних позиціях. Ферити кобальту володіють великим значенням коерцитивної сили, константи магнітокристалічної анізотропії, високим значенням температури Кюрі, низькою залишковою намагніченістю, хімічною стабільністю [4]. Синтез CoFe_2O_4 з високими магнітними характеристиками можливий з використанням різноманітних технологій [5, 6].

Як правило, ферит цинку має нормальну структуру шпінелі, де іони Zn^{2+} переважно займають тетраедричні позиції, а іони Fe^{3+} октаедричні позиції, що призводить до низьких магнітних властивостей.

З огляду на складну будову феритів, помітний вплив на властивості феритів надає як природа катіонів, так і розташування по підграткам. Саме подвійні та потрійні ферити ABCFe_2O_4 хімічно стійкі та мають специфічні фізико-хімічні властивості [7].

Наприклад, складні наноферити цинку є ефективними фотокаталізаторами розкладання органічних барвників, причому ступінь розкладання 99% досягалася за 20 хвилин [8].

Наночастинки марганцевих феритів, заміщені одночасно Co^{2+} і Zn^{2+} ($\text{Co}_y\text{Zn}_y\text{Mn}_{1-2y}\text{Fe}_2\text{O}_4$ при $y = 0,0-0,5$), були отримані гідротермальним методом. Аналіз впливу заміщення іонами Co^{2+} та Zn^{2+} іонів Mn^{2+} в шпінельних феритах MnFe_2O_4 показав, що значення забороненої зони знаходяться в межах 1,41–1,54 еВ. Менші значення E_g пояснюються більшим розміром частинок [9]. Встановлено, що магнітні наночастинки цинкзаміщеного фериту марганцю $\text{Mn}_{1-x}\text{Zn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0,00, 0,20, 0,40, 0,60, 0,80, 1,00$) можна синтезувати методом співосадження з формуванням висококристалічної однофазної структури кубічної шпінелі та просторовою групою Fd_3m . При цьому розмір кристалітів зменшується від 20 до 10 нм, ширина забороненої зони збільшується від $\sim 2,26$ до $\sim 2,63$ еВ [10].

Шпінельні наночастинки фериту кобальту зі складом $(\text{M}_x\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$, де $\text{M}=\text{Zn}, \text{Cu}, \text{Mn}$; $x = 0,0; 0,25; 0,5; 0,75$) були синтезовані золь-гель методом. Ферит складу $\text{Mn}_{0,75}\text{Co}_{0,25}\text{Fe}_2\text{O}_4$ показав найкращі результати в реакції розкладання метиленового синього (МС) (96,0% видалення під час 100 хв ультрафіолетового впливу в лужному розчині) [11].

В роботі [12] проведено рентгенівські та Мессбауерівські дослідження фериту $\text{Co}_{0,5-x}\text{Mn}_x\text{Zn}_{0,5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($0,5 > x > 0,1$), отриманого методом

співосадження зі стехіометричних водних розчинів. Результати досліджень показали утворення кубічної фази із середнім розміром кристалітів приблизно 5–8 нм. причому зі збільшенням вмісту Mn до 0,4 точка Кюрі, коерцитивна сила та намагніченість насичення зменшуються.

Наночастинки фериту $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ були синтезовані за допомогою гідротермального процесу за 180°C . Показано збільшення розміру частинок зі збільшенням концентрації катіонів Mn. Виявлено, що намагніченість насичення (M_s) $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$, спочатку швидко зростає, а потім повільно збільшується зі збільшенням концентрації Mn, пояснюються це розташуванням катіонів по окта- та тетра- позиціям в кристалічній решітці наночастинок шпінельного фериту [13].

Mn-заміщені ферити Zn з хімічною формулою $\text{Zn}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ (0,0; 0,1; 0,2; 0,3) синтезовано методом золь-гель автоспалювання. Петлі гістерезису всіх зразків показують, що коерцитивна сила і намагніченість насичення становить 180–220 Ерстед, значення намагніченості насичення приблизно однакові 18–21 $\text{A m}^2/\text{kg}$ [14]. Визначені ступені розкладання метиленового синього для серії фотокаталізаторів CoFe_2O_4 , що синтезувалися гідрофазним методом від впливом УЗ-випромінювання. Синтезовані зразки показали високу каталітичну активність щодо розкладу МС – 85% за 150 хвилин [15]. Автори використовували синтез мікрогранул фериту $\text{Co}_{1-x}\text{Mn}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($x = 0,0-0,2$) шляхом розпилювальної сушки та визначили їх структурні, морфологічні та магнітні властивості. Встановлено значення магнітного насичення від 82,27 до 86,18 $\text{A m}^2/\text{kg}$ і 77,05–79,87 $\text{A m}^2/\text{kg}$ для $\text{Co}_{0,9}\text{Mn}_{0,1}\text{Fe}_2\text{O}_4$ за 10 K і 300 K відповідно. Структурні дослідження, також показують, що заміна Co на Mn збільшує ступінь інверсії в структурі кубічної оберненої шпінелі. Двовалентні (Co^{2+} , Mn^{2+}) і тривалентні (Fe^{3+} , Mn^{3+}) катіони розподілені по-різному в тетраедричних і октаедричних положеннях [16].

В роботі розглянуто структурні, оптичні та магнітні характеристики наночастинок CoFe_2O_4 , легуваних Mn, синтезованих методом хімічного співосадження. Рентгенівський аналіз підтвердив значне зменшення розміру кристалітів з ~ 17 нм до 10 нм зі збільшенням вмісту Mn від 0 до 1. Заміщення Mn сприяє переходу від феромагнетика до суперпарамагнетика та зменшення намагніченості насичення та коерцитивної сили при легуванні Mn [17].

Тобто впродовж останніх десятиріч ферити перехідних металів є об'єктом багатьох дослі-

джень внаслідок поєднання високих магнітних, оптичних, електричних та каталітичних властивостей. Крім того, наноструктуровані ферити мають низку переваг в порівнянні з їх консолідованими аналогами, завдяки їх унікальним фізичним та хімічним властивостям.

Метою статті є встановлення залежності між структурними і магнітними характеристиками та складом феритів.

Виклад основного матеріалу. Методики проведення експерименту. Для синтезу зразків (таблиця 1) використовували ферум(II) сульфат, кобальт сульфат, манган сульфат, цинк сульфат, натрій гідроксид аналітичної чистоти. Ферити з загальною формулою $MeFe_2O_4$ ($Me=Co, Mn, Zn,$) були синтезовані з використанням плазмового методу, що більш детально описаний в роботі [18]. Рентгенограми зразків були отримані на приладі ДРОН-2.0 при монохроматичному $CoK\alpha$ випромінюванні. Розмір кристалітів визначали за допомогою формули Дебая-Шерера.

Визначення магнітних характеристик проводилося за допомогою вібраційного магнітометра. ЕПР-спектри були отримані за допомогою радіоспектрометра Radioran SE/X-2543. Для характеристики сигналів ЕПР використовували інтенсивність сигналу, резонансну частоту. Результати були використані для розрахунку енергії забороненої зони. Енергію забороненої зони визначали зі спектрів дифузного відбиття зразків використовуючи функцію Кубелки-Мунка.

Для вивчення впливу катіонного складу на властивості феритів було використано симплекс-решітчастий план, який вимагає мінімальної кількості експериментів для вивчення впливу факторів на вибрані функції відгуку. Молярні концентрації кобальту, марганцю та цинку відповідно були обрані як фактори x_1, x_2, x_3 . План експерименту показаний у таблиці 1.

Таблиця 1

Матриця планування симплекс-решітчастого методу {3,3}

№ зразка	Формула	Mn	Zn	Co
1	$MnFe_2O_4$	1.00	0	0
2	$Mn_{0.67}Zn_{0.33}Fe_2O_4$	0.667	0.33	0
3	$Mn_{0.33}Zn_{0.67}Fe_2O_4$	0.333	0.667	0
4	$ZnFe_2O_4$	0	1.00	0
5	$Co_{0.33}Zn_{0.67}Fe_2O_4$	0	0.667	0.33
6	$Co_{0.67}Zn_{0.33}Fe_2O_4$	0	0.333	0.667
7	$CoFe_2O_4$	0	0	1.00
8	$Co_{0.67}Mn_{0.33}Fe_2O_4$	0.33	0	0.667
9	$Co_{0.33}Mn_{0.67}Fe_2O_4$	0.667	0	0.333
10	$Co_{0.33}Zn_{0.33}Mn_{0.33}Fe_2O_4$	0.333	0.333	0.333

Діаграми «властивості-склад» були зображені за допомогою ізоліній. Функціями відгуку були коерцитивна сила (H_c), Ерстед; намагніченість насичення (M_s), $A\ m^2/kg$; a – параметр решітки, Å ; K – коефіцієнт магнітокристалічної анізотропії, R – коефіцієнт прямокутності.

$$K = \frac{H_c M_s}{0.96}$$

Результати та обговорення. Отримані рентгенограми зразків показали, що дифрактограми мають індексовані піки (111), (220), (311), (222), (400), (422), (511) і (440), що відповідають типовій фазі шпінелі. Як видно з рисунку 1 спостерігається зменшення інтенсивності зі збільшенням концентрації мангану у феритах $Mn_xCo_{1-x}Fe_2O_4$ і $Mn_xZn_{1-x}Fe_2O_4$ ($0 < x < 1$) (зразки 7–9, 1–3). Найбільш інтенсивні піки відповідають кобальт-цинковим феритам. Зі збільшенням вмісту цинку ступінь кристалічності феритів збільшується.

Слабке дифузне розсіювання на малих кутах свідчить про присутність в досліджених матеріалах поряд з кристалічними фазами невеликої кількості речовини в рентгеноаморфному стані.

Крім того інтенсивність піків найбільша для простих феритів поява додаткових катіонів призво-

Таблиця 2

Результати експериментів

№	H_c , Ерстед	M_s , $A\ m^2/kg$	M_r , $A\ m^2/kg$	R	a , Å	E, eB	$K_{аніз}$	$I_{(111)}$	$L_{(111)}$	M, %
1	41	111,79	12,85	0,11494	8,3516	1,58	4774,36	99,8	451	0,00104
2	8	47,7	0,669	0,0140	8,341	1,72	397,50	81,2	343	0,00153
3	8	3,75	0,21	0,056	8,3573	1,82	31,25	69,8	350	0,0004
4	19	3,93	0,047	0,0119	8,3592	1,55	77,78	58,9	274	0,00264
5	1	37,26	0,191	0,0051	8,3430	1,71	38,81	64,5	310	0,000236
6	70	74,94	5,35	0,07139	8,366	1,82	5464,37	30,02	266	0,0085
7	1124	105,41	49,53	0,46987	8,3689	1,9	123417,50	79,5	201	0,00126
8	706	69,1	18,79	0,27192	8,3795	1,75	50817,29	28,96	275	0,00162
9	370	73,05	24,81	0,3396	8,3487	1,63	28154,69	78,9	366	0,00182
10	0	9,72	0,001	0,000102	8,36025	1,59	0	38,9	227	0,0083

дить для аморфізації продукту. Наявність широких піків вказує на нанодисперсну природу та малий кристалічний розмір зразків. Найбільший розмір кристалітів відповідає феритам марганцю.

Розраховані значення параметру решітки (рис. 2) показали, що параметр решітки збільшується у міру збільшення концентрації цинку у складах $Zn_xCo_{1-x}Fe_2O_4$. Мінімальні значення відповідають подвійним складам за $x > 0,55$. Більш різко виражене збільшення параметра решітки спостерігається для зразків 7,8, невелике для 4–7 і зменшення для 1,2. Це вказує на заміну меншого іону Co^{2+} (0,72 Å) більшим іоном Mn^{2+} (0,80 Å) і, відповідно, Mn^{2+} (0,80 Å) на Zn^{2+} (0,74 Å) (рис. 2–4, таблиця 2).

У складних феритах марганцю цинку заміна меншого іона цинку більшим катіоном Mn^{2+} в фериті марганцю-цинку викликає зменшення постійної решітки.

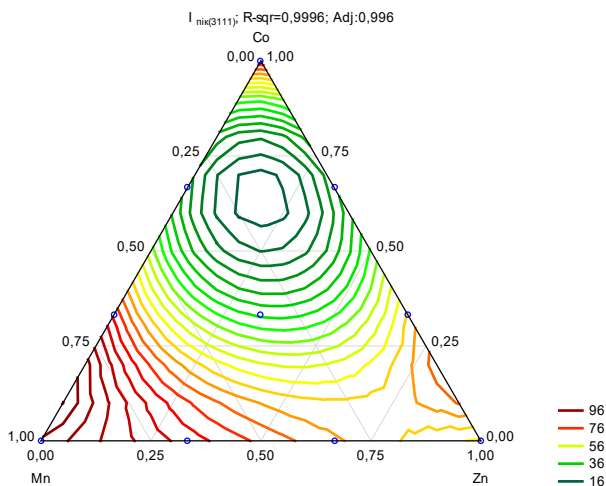


Рис. 1. Залежність інтенсивності піку (311) на рентгенограмах феритів від складу феритів

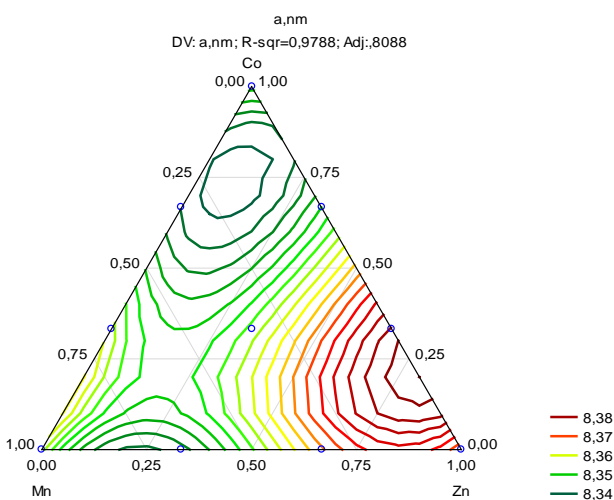


Рис. 2. Залежність параметра решітки від складу феритів

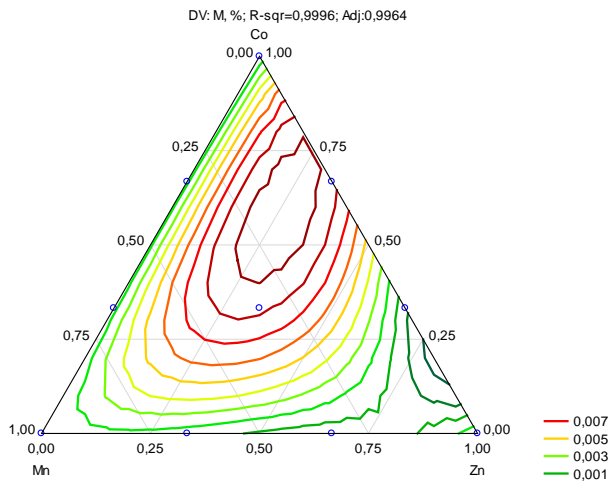


Рис. 3. Залежність густини дислокацій від складу феритів

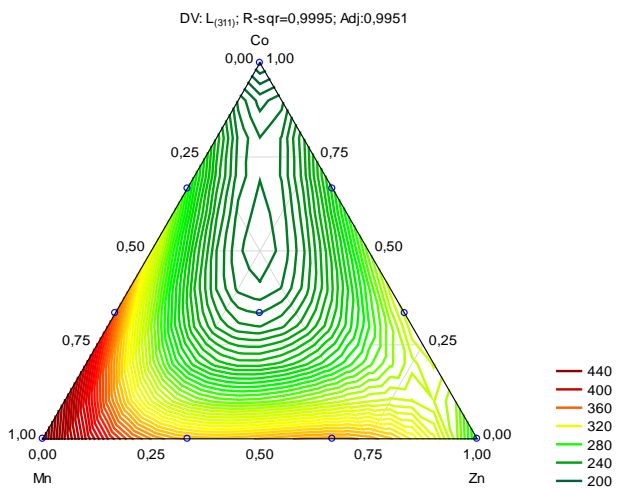


Рис. 4. Залежність розміру кристаліту від складу феритів

Таку аномальну поведінку можна пояснити тим, що ферит марганцю змішана шпінель і значна частка Mn^{2+} і Zn^{2+} займає октаедричні позиції і переводить катіони Fe^{3+} в тетраедричних сайти проти їх хімічних переваг. Оскільки іони Fe^{3+} мають менший іонний радіус (0,64 Å), то заміна їх в тетраедричних позиціях зміст більших двовалентних іонів призводить до зменшення параметра решітки. Саме цією обставиною можна також пояснити зміну магнітних властивостей в марганцю-цинкових феритах.

Намагніченість насичення (M_s) і коерцитивна сила (H_c), остаточна намагніченість (M_{oct}), коефіцієнт прямокутності петля гістерезису (R), коефіцієнт магнітокристалічної анізотропії (K) виведені з кривих намагнічування, приведені в таблиці 2 та рисунках 5–7.

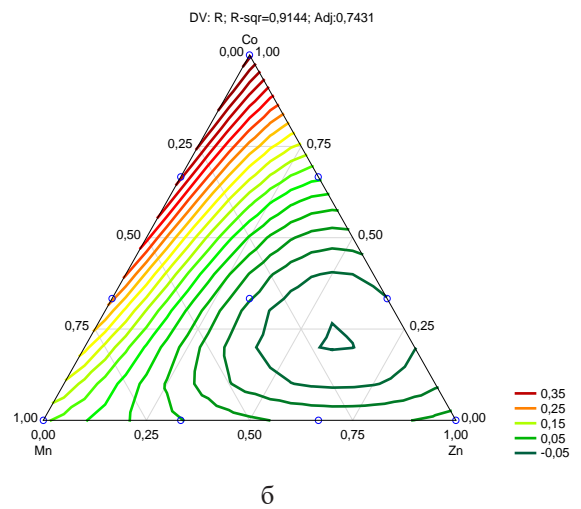
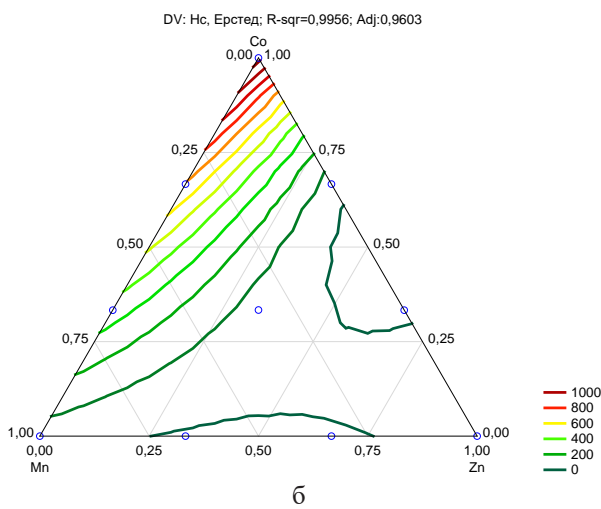
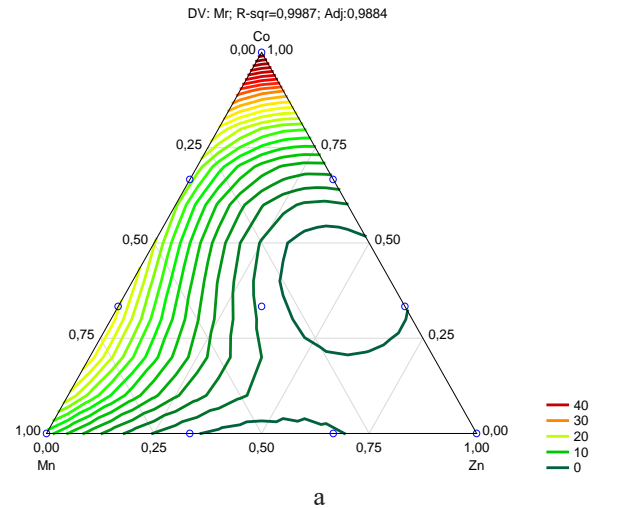
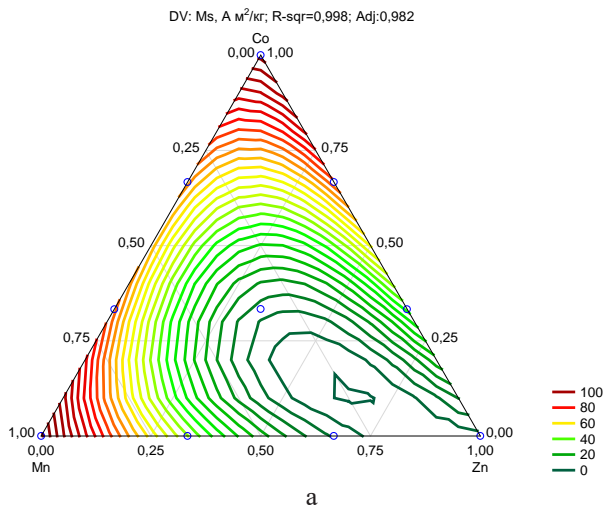


Рис. 5. Залежність намагніченості насичення (а), коерцитивної сили (б)

Рис. 6. Залежність остаточної намагніченості (а), коефіцієнту прямокутності (б) від складу феритів

Магнітні характеристики матеріалу є найважливішими властивостями, які визначаються шляхом запису кривих намагнічування при кімнатній температурі. Підвищення вмісту кобальту в системі призводить до збільшення коерцитивної сили і намагніченості насичення. Збільшення вмісту в феритах катіонів кобальту від 0 до 1,0, обумовлює значне зростання коерцитивної сили від 2–3 до 1140 Ерстед. Зазначений факт підтверджується зміщенням значень параметра решітки d (8,35 нм) в область менших значень (8,32 нм), а також збільшенням ступеня кристалічності та розміру кристалітів. Найбільші значення намагніченості насичення відповідають $MnFe_2O_4$ та $CoFe_2O_4$ (Ms становить 111,8 А м²/кг і 105,41 відповідно).

Причому, значення намагніченості насичення в більшій мірі залежить від вмісту катіонів

кобальту. Найбільші магнітні показники відповідають максимальному вмісту кобальту. Таким чином магнітні ферити з підвищеною коерцитивною силою відповідають складам 7, 8, 9, а магнітні ферити з низькою коерцитивною силою складам 4, 5, 6, 7. На діаграмах можна виділити два рівносторонніх трикутника з координатами вершин А (0,1,0) Б (0,25,0,75,0) С (0,0,75,0,25) та В (0,0,1) Е (0,25,0,75,0) Д (0,0,75,0,25) яким відповідає область більш високих значень намагніченості насичення. Найбільші значення коефіцієнту прямокутності відповідають феритам кобальту (рис. 6б).

Для оцінки оптичних властивостей феритів були отримані спектри дифузного відбиття. Всі 10 зразків показали інтенсивну смугу поглинання в УФ області електромагнітного спектру. Ширина забороненої зони в зразках визначалася за рівнянням

$$\alpha_{hv} = A (hv-E)^n, n=2$$

де α – коефіцієнт поглинання, ν – частота світла, E – енергія забороненої зони, еВ, а – константа пропорційності.

Ширина забороненої зони, розрахована для CoFe_2O_4 , MnFe_2O_4 , ZnFe_2O_4 становила відповідно 1,58 еВ, 1,59 еВ, 2,2 еВ. Енергія забороненої зони феритів показана у таблиці 2. Вона збільшується зі збільшенням вмісту Zn (рис. 7б). Значна зміна значень енергії забороненої зони може спостерігатися завдяки розбіжності в середньому розмірі кристалітів, постійній решітці, фазовій чистоті, концентрації носія заряду та деформації кристалічної решітки.

Висновки. Ферити $\text{Mn}_x\text{Co}_y\text{Zn}_{1-x-y}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (де $0 < x < 1$, $0 < y < 1$) були синтезовані комбінованим методом співосадження і плазмової обробки.

Закономірності зміни властивостей феритів були вивчені симплекс-решітчатим методом планування експерименту. Отримані дисперсні ферити були охарактеризовані за допомогою рентгенофазового аналізу, ЕПР спектроскопії, вібраційної магнітометрії. Було встановлено роль катіонів, що визначають магнітні властивості. Перспективними магнітними матеріалами є кобальт цинк манганвміщуючі ферити. Синтезовані зразки, що вміщують кобальт та манган мають високі магнітні властивості, що забезпечує їх подальше використання в якості складових композиційних матеріалів.

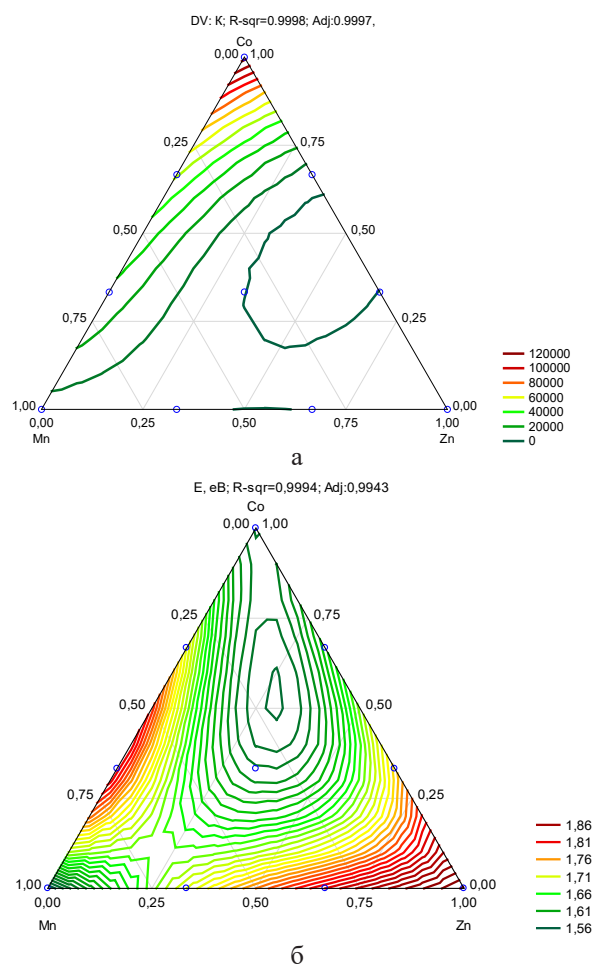


Рис. 7. Залежність коефіцієнту анізотропії (а) та ширини забороненої зони (б) від складу феритів

Список літератури:

1. Dippong T., Levei E. A., Cadar O. Recent advances in synthesis and applications of MFe_2O_4 ($\text{M} = \text{Co}, \text{Cu}, \text{Mn}, \text{Ni}, \text{Zn}$) nanoparticles. *Nanomaterials*. 2021. 11(6), Pp. 1560. <https://doi.org/10.3390/nano11061560>
2. Talebniya S., Sharifi I., Saeri M. R., Doostmohammadi A. Study of cation distribution and magnetic properties of MFe_2O_4 ($\text{M} = \text{Fe}, \text{Co}, \text{Zn}, \text{Mn}, \text{and Cu}$) nanoparticles. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2022. 35(3), Pp. 899–908. <https://doi.org/10.1007/s10948-021-06129-w>
3. Antony T. J., Thirunavukkarasu K., Jagannathan K. Structural, morphological and magnetic analysis of hydrothermally synthesized MnFe_2O_4 magnetic nanoferrites. *Materials Today: Proceedings*. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.051>
4. Balasubramani V., Mowlia V., Sivakumar A., Al Sdran N., Maiz F., Shkir M. Design and investigation of Sono-chemical synthesis of pure and Sn doped CoFe_2O_4 nanoparticles and their structural and magnetic properties. *Inorganic Chemistry Communications*, 2023. 155, Pp. 111015. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111015>
5. Bayça F. Characterization and magnetic properties of CoFe_2O_4 nanoparticles synthesized by the co-precipitation method. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2024. 21(1). Pp. 544–554. <https://doi.org/10.1111/ijac.14518>
6. Kancharla R., Vudayagiri A. Structural, Magnetic and Optical Properties CoFe_2O_4 Thin Films. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2023. 36(1), Pp. 119–130. <https://doi.org/10.1007/s10948-022-06429-9>
7. Arteaga-Cardona F., Pal U., Alonso J. M., de la Presa P., Mendoza-Alvarez M. E., Salazar-Kuri U., Mendez-Rojas M. A. Tuning magnetic and structural properties of MnFe_2O_4 nanostructures by systematic introduction of transition metal ions M^{2+} ($\text{M} = \text{Zn}, \text{Fe}, \text{Ni}, \text{Co}$). *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019. 490, Pp. 65496. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165496>

8. Jangam K., Patil K., Balgude S., Patange S., More P. Synthesis and characterization of magnetically separable $Zn_{1-x}Co_xFeMnO_4$ nanoferrites as highly efficient photocatalyst for degradation of dye under solar light irradiation. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2021.148, Pp. 109700. <https://doi.org/10.1016/j.jpss.2020.109700>
9. Asiri S. et al. Hydrothermal synthesis of $Co_yZn_yMn_{1-2y}Fe_2O_4$ nanoferrites: magneto-optical investigation. *Ceramics International*. 2018. 44.(5) Pp. 5751-5759. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.233>
10. Patade S. R., Andhare D. D., Kharat P. B., Humbe A. V., Jadhav K. M. Impact of crystallites on enhancement of bandgap of $Mn_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ ($1 \geq x \geq 0$) nanospinels. *Chemical Physics Letters*, 2020.745, Pp. 137240. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2020.137240>
11. Maksoud M. I. A. A. et al. Antibacterial, antibiofilm, and photocatalytic activities of metals-substituted spinel cobalt ferrite nanoparticles. *Microbial pathogenesis*. 2019. 127. Pp. 144-158. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2018.11.045> Get rights and content
12. Sharifi I., Shokrollahi H. Structural, magnetic and Mössbauer evaluation of Mn substituted Co–Zn ferrite nanoparticles synthesized by co-precipitation. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2013.334, Pp. 36-40. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2013.01.021>
13. Wang J., Zeng C., Peng Z., Chen Q. Synthesis and magnetic properties of $Zn_{1-x}Mn_xFe_2O_4$ nanoparticles. *Physica B: Condensed Matter*, 2004. 349(1-4), Pp, 124-128. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2004.02.014>
14. Ahmad M., Amin K., Rehman A. U., Wahab A., Wabaidur S. M. Detailed investigation of Mn-substituted Zn ferrites for microwave applications up to 6 GHz. *Materials Science and Technology*, 2024. Pp. 02670836231217195. <https://doi.org/10.1177/02670836231217195>
15. Sun M., Han X., Chen S. Synthesis and photocatalytic activity of nano-cobalt ferrite catalyst for the photo-degradation various dyes under simulated sunlight irradiation. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2019.91. – Pp. 367-376. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.12.005>
16. Ansari S. M., Sen D., Haritha K., Kolekar Y. D., Ramana C. V. Low-cost, ecofriendly, and large-scale synthesis of nanostructured $Co_{1-x}Mn_xFe_2O_4$ microgranules with enhanced magnetic performance by chemical spray drying processing. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023.672, Pp.131697. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131697>
17. Priyadarshini, P., & Pushpanathan, K. (). Tuning of crystallite size, energy gap, and magnetic property of Mn-doped $CoFe_2O_4$ nanoparticles. *Surface Review and Letters*, 2021.28(06), Pp. 2150052. <https://doi.org/10.1142/S0218625X21500529>
18. Frolova L. A., Derhachov M. P. The Effect of Contact Non-equilibrium Plasma on Structural and Magnetic Properties of $Mn_xFe_{3-x}O_4$ Spinels. *Nanoscale research letters*, 2017.12(1), P. 505-517. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2268-5>

Frolova L.A., Nikitin M.O., Rodin D.O. STRUCTURAL, OPTICAL AND MAGNETIC PROPERTIES OF NANO-DISPERSE FERRITES $Mn_xCo_yZn_{1-x-y}Fe_2O_4$ (where $0 < x < 1$ and $0 < y < 1$)

Nanocrystalline ferrite materials attract considerable interest of researchers due to their unique properties, which determine the study of these objects in various fields of science, including physics, chemistry, biology, medicine, materials science and engineering. It is ferrite nanomaterials that have increased reactivity, specific optical, electrical and magnetic properties. The peculiarity of such materials is that the main factors that determine their properties are the structure, morphological features, and particle size. In addition, the properties can be adjusted by changing the chemical composition. In this work, composite ferrites $Mn_xCo_yZn_{1-x-y}Fe_2O_4$ (where $0 < x < 1$ and $0 < y < 1$) were synthesized by the plasma method. X-ray phase analysis, vibrational magnetometry and spectroscopic analysis were used to characterize the obtained samples. To study the effect of the cation composition on the properties of ferrites, a simplex lattice plan was used, which requires a minimum number of experiments. The coercive force, saturation magnetization, lattice parameter, magnetocrystalline anisotropy coefficient, hysteresis loop squareness coefficient, final magnetization, band gap, crystallite size, degree of microstrain were selected as the response functions. It was established that the obtained ferrite nanoparticles have a spinel structure. The lattice parameter changes depending on the radius of the metal cation and the location of the ions on the sublattices. The minimum values of the lattice parameter and the maximum values of the coefficient of magnetocrystalline anisotropy, saturation magnetization, and coercive force correspond to the dual compositions of Mn–Co ferrites. Synthesized nanoferrites have a band gap energy of 1.55–1.9 eV. It was established that $Zn_{1-x}Co_xFe_2O_4$ ferrites and $Zn_{1-x}Co_xMn_{0.5}Fe_2O_4$ ($0 < x < 1$) can be used for the synthesis of composite materials.

Key words: ferrites, saturation magnetization, coercive force, lattice parameter, magnetocrystalline anisotropy, squareness coefficient.

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 641.05

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/21>**Фролова Н.Е.**

Національний університет харчових технологій

Ворона Ю.В.

Національний університет харчових технологій

Вишневецька Л.В.

Національний університет харчових технологій

Бобін М.А.

Національний університет харчових технологій

РОЗРОБЛЕННЯ ДІЄТИЧНИХ ТА АЮРВЕДИЧНИХ СТРАВ ДЛЯ ЗАКЛАДІВ РЕСТОРАННОГО ГОСПОДАРСТВА

Об'єднуючи рекомендації дієтичного та аюрведичного харчування, сучасні положення науки про здорове харчування, магістрами професійно-освітньої програми «Технологія дієтичних та аюрведичних харчових продуктів» Національного університету харчових технологій розроблено дієтичні та аюрведичні страви на природній сировині. Обґрунтовано склад нових страв: дієтичний узвар з фітокомпозицією, аюрведичний зефір з прянощами та морквяним порошком, овочева ікра з топінамбуру, гарбуза та кабачка.

Встановлено оптимальні режими екстрагування дослідної фітокомпозиції з ехінацеї пурпурової, стевії та м'яти перцевої у співвідношенні 2:1:1 для максимального вилучення БАР антиоксидантної дії. Розроблено технологію узвару у складі яблука, груші сушені, чорнослив, родзинки з екстрактом фітокомпозиції.

До складу аюрведичного зефіру з балансуванням стану людей конституцій Вата Доша, Пітта Доша, Капха доша до традиційної рецептури внесено додатково: морквяний порошок в кількості 2,5% складу. а також прянощі: бодян, кориця, кардамон, з оптимальним співвідношенням комбінації – 1:2:0,6. Аюрведичний зефір має колір ніжно жовтий, солодкий смак з нотками кардамону та після смаком кориці. Аромат приємно пряний з нотками кориці, бодяну та кардамону

Розроблено та оптимізовано склад овочевої ікри з урахуванням добової потреби у функціональних інгредієнтах. За сировину обрано сорт гарбуза «Мармуровий», топінамбуру «Інтерес», кабачку «Курнек». Визначено оптимальні режими НВЧ-обробки рослинної сировини: для топінамбура питома потужність – 450 Вт/дм³, тривалість 4,5 хвилини; для гарбуза – 600 Вт/дм³, тривалість 3,5 хвилини;

Проведені дослідження дієтичних та аюрведичних страв сприятимуть здоровому харчуванню українців. Розширюватимуть асортимент продукції закладів ресторанного господарства. Будуть привертати увагу до Аюрведи, поширюючи аюрведичні знання в Україні.

Ключові слова: пряно-ароматична сировина, фітоекстракт, узвар, аюрведа, зефір, топінамбур, овочева ікра.

Постановка проблеми. У пошуках здорового харчування більшість населення не задовольняється традиційними підходами до формування здорового харчування. Це обумовило розвиток альтернативних систем харчування та дієт [1].

Станом на сьогодні ми можемо стверджувати про зростання запиту щодо вегетаріанства, популярним стає здорове харчування, натуральні

засоби профілактики і естетичне лікування хвороб. Зростає попит на дієтичне та аюрведичне харчування [2].

Також додамо, що впродовж останніх років спостерігається підвищений інтерес до БАР антиоксидантної дії та збільшення використання їх рослинних джерел у виробництві харчової продукції. Використання навіть невеликої кількості

прянощів дозволяє не тільки надавати стравам нових оригінальних смакоароматичних властивостей, але й значно підвищувати вміст у них корисних речовин [3].

В раціональному харчуванні важливу роль відіграють напої, які споживаються протягом кожного дня. Одним з традиційних українських напоїв, що дозволено вживати при раціональному харчуванні є узвар. Оскільки, він завжди користується високим попитом, доцільно урізноманітнити його склад композицією прянощів, а також підвищити його харчову цінність на благо людей [4, 6].

Ситуація на світовому ринку кондитерських виробів свідчить про наявність стабільної тенденції до збільшення обсягів виробництва.

В Україні, попри військовий стан, виробляють близько 2 млн. т кондитерських виробів на рік. Споживання кондитерських виробів на 1 людину в середньому становить 32–50 г/добу, у перерахунку на калорійність – 628–753 кДж) [5].

Розширення асортименту кондитерських виробів дієтичного, аюрведичного спрямування відповідно індивідуальних потреб різних конституційних груп населення (*Вата Доша, Пітта Доша, Капха доша*) є актуальним та передбачає проведення наукових досліджень в напрямку озвучених проблем.

Незамінними факторами харчування є вживання як свіжих, так і варених овочів. Актуальним завданням є розробка дієтичного продукту зі свіжих і варених овочів у вигляді овочевої ікри та постачання їх особам, переважаючої конституції Вата Доша, Капха Доша, Пітта Доша, як продукту персоналізованого харчування із зменшенням ефектів дисбалансу [7].

Отже, поєднання знань аюрведичних положень, щодо персоналізованого харчування, рекомендацій дієтичних страв та раціонів, в кінцевому результаті принесуть користь для здоров'я людини та зростання попиту серед споживачів у закладах ресторанного господарства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Під час аналізу наукових джерел та розроблення рецептур дієтичних та аюрведичних страв, їх практичного завершення використовували знання як традиційної науки про харчування так і розвиток дієтичних рекомендацій, а також відомості з аюрведичних джерел та приписів [8]. В свою чергу ці знання дозволили знайти необхідні складові компоненти для інноваційних рецептур дієтичних та аюрведичних страв.

Згідно з даними Національного інституту алергії та інфекційних захворювань в Америці близько 1 млрд

людей щороку хворіють на простудні захворювання. Частота інфекційних захворювань на кожного дорослого становить від 2–4 випадків, а на кожну дитину від 6 до 10 випадків хвороби на рік. Така поширеність завдає значних економічних втрат [9].

Риновірус і коронавірус залишаються найбільш поширеними збудниками інфекції, але крім них відомо ще більше 200 інших типів вірусів, які також призводять до розвитку респіраторних захворювань [10].

Під пильну увагу дослідників потрапляє рослина сировина, в тому числі прянощі як профілактична та додаткова терапія сучасних інфекцій, оскільки є справжньою скарбницею БАР з цінними фізіологічними властивостями, в ній містяться високоактивні речовини [4].

На підставі аналізу й узагальнень літературних даних щодо вмісту БАР в рослинній сировині, було прийнято рішення розробити рецептуру фітоекстрактів у складі ехінацеї пурпурної, м'яти та стевія. Настой на основі ехінацеї пурпурної давня використовуються в народній медицині. М'ята та стевія є доступними для їх раціонального використання, в тому числі людям з різними ризиками для здоров'я [11].

Одним з ефективних способів повноцінного використання арсеналу БАР є процес екстрагування з отриманням фітоекстракту. Фітоекстракти можна розглядати як вагоме джерело антиоксидантів для посилення імунітету людини [12].

Сучасні тенденції в здоровому харчуванні вимагають створення кондитерських виробів зі зниженою калорійністю та підвищеним вмістом БАР [13]. Збагачення цих виробів композицією прянощів може не тільки підвищити їхню харчову цінність, але й покращити якість та подовжити термін зберігання.

У виробництві кондитерських виробів виробляються і користуються підвищеним попитом вироби піноподібної структури – пастила, зефір, цукерки «Суфле», «Пташине молоко» та ін.

Тому важливо досліджувати та розробляти нові рецептури кондитерських виробів озвученої групи, які були б корисними для здоров'я та мали функціональне значення, при цьому будучи доступними для всіх верств населення [14].

У виробництві пастило-мармеладних виробів важливим компонентом є фруктово-ягідні заготовки із забезпеченням утворення драгелеподібної структури за рахунок пектинових речовин [13].

Переробка овочів є досить трудомісткою, потребує зберігання та утилізації відходів, наявності спеціальних цехів і персоналу [15].

Використання овочевих напівфабрикатів високого ступеня готовності має низку суттєвих переваг: по-перше, підприємства харчування можуть отримувати стандартизований безпечний продукт стабільної якості; по-друге, з'являється можливість скоротити складські площі для зберігання сирих овочів.

Науковець Косим В.Д. розробив і запатентував нову технологію. «Спосіб виробництва напівфабрикату кабачків чи патисонів». Науковцями Харченко З.М. та інші запатентовано «Спосіб виробництва кабачків в аличевому соку» Новий метод виробництва передбачає підготовку кабачків, додавання прянощів, залиття підготовленим розчином соку аличевого [16].

Метою статті є проведення наукового обґрунтування та здійснення практичних розробок дієтичних та аюрведичних страв, зокрема фітоекстракту у виробництві узвару, аюрведичного зефіру з композицією рослинної сировини, дієтичної ікри з місцевої овочевої сировини, зокрема топінамбуру, гарбуза та кабачка відповідно індивідуальної конституції людини для максимального збалансування природних життєвих станів, з високими показниками якості та безпеки.

Виклад основного матеріалу. Відбір проб і підготовку обраної сировини здійснювали за ДСТУ 7963:2015; органолептичну оцінку проводили за ДСТУ 7040:2009; масову частку сухих речовин – за ДСТУ 8402:2015; кислотність – за ДСТУ 4957:2008; реологічні властивості – на ротатійному віскозиметрі «Реотест-2» визначення кількості БАР за методиками [1]. Дослідження проводилися в трьох паралельних визначень з опрацюванням результатів математично-статистичними методами. Рівень імовірності результатів $p=0,95$, середньо-статичне відхилення S^2 в межах 0,025.

Основою рецептури для виробництва фітоекстракту обрано ехінацею пурпурову ТМ «Best Nuts», відповідно до ДСТУ 7666:2014 «Лікарська рослина (ехінацея пурпурова). Технічні умови»; стевію ТМ «Green Leaf», згідно з ДСТУ 8207:2015 «Стевія. Технічні умови»; м'ята перцеву ТМ «Банка спецій», відповідно до ДСТУ ISO 2256:2005 «М'ята перцева сушена. Технічні умови».

Хімічний склад обраної сировини має важливе значення, оскільки ми повинні знати переваги нашої продукції серед інших і чим вона буде корисна для споживачів.

Було проведено порівняльні дослідження щодо вмісту БАР обраної пряної сировини для фітоекстракту – ехінацеї пурпурової, стевії та м'яти перцевої.

В таблиці 1 наведено результати опрацювання сучасних літературних джерел з науковим підходом до систематизації та узагальненням даних

Таблиця 1

Вміст БАР обраної сировини

Найменування показника	Ехінацея пурпурова	Стевія	М'ята перцева
Флавоноїди, %	6,55±0,05	2,66±0,02	2,58±0,04
Каротини, мг/100 г	1,48±0,02	1,77±0,03	0,21±0,01
Вітамін С, мг/100 г	54,62±2,16	15,24±0,45	31,82±0,91
Катехіни, %	0,41±0,01	0,68±0,01	0,26±0,01
Дубильні речовини, %	1,73±0,02	2,38±0,04	10,53±0,36

Відповідно результатам аналітичних досліджень – вміст вітаміну С та флавоноїдів найбільше в ехінацеї пурпуровій. Стевія лідирує по вмісту каротину та катехінів, а от м'ята перцева містить найбільше дубильних речовин.

У дослідженні для вибору композиції використовували чотири модельні зразки за співвідношеннями прянощів: ехінацея пурпурова:стевія: м'ята: № 1 – 1:1:1, № 2 – 2:1:1, № 3 – 1:2:1, № 4 – 1:1:2. Дегустаційна комісія Національного університету харчових технологій проводила дескрипторно-профільний аналіз композицій за 7 дескрипторами. Співвідношення сировини у відношенні 2:1:1, зокрема композиція № 2 виявилася найбільш оптимальним за смаковою гармонією.

Приготування фітоекстракту з композиції пряної сировини здійснювали за експериментально підтвердженими параметрами отримання (таблиця 2).

Таблиця 2

Параметри екстрагування композицій пряної сировини

№ п/п	Назва параметру	Значення
1	Час екстракції, год	6
2	Частка спирту в екстрагенті, об. %	40
3	Співвідношення «сировина:екстрагент»	1:10
4	Температура екстракції, °С	20±2
5	Ступінь помелу сировини, мкм	500...1000

Фітоекстракт за органолептичними показниками має колір голубувато-зелений, запах – характерний обраним прянощам. На смак – помірно солодкий та пряно-освіжаючий.

В таблиці 3 відображено результати визначення фізико-хімічних показників фітоекстракту

Таблиця 3

Фізико-хімічні показники отриманого фітоекстракту

Назва показника	Фітоекстракт
Масова частка вологи, %	15,3±0,05
Густина при 20°C, г/см ³	0,956±0,003
Показник заломлення при 20°C	1,378±0,001

Отриманий фітоекстракт можна вносити до складу інших харчових продуктів із метою збагачення БАР, зокрема готувати узвар.

До складу класичної рецептури зефіру входять: яблучне пюре, цукор, альбумін, вода питна, агар-агар, інвертний цукор. До удосконаленого аюрведичного зефіру пропонується вводити такі прянощі як: бодян, кориця, кардамон, куркума. Окрім цього до складу вносять морквяний порошок.

Композицію прянощів встановлювали дослідженням 3 модельних зразків, зокрема бодян: кориця: кардамон: № 1 – 1:1:0,7, № 2 – 1:2:0,6, № 3 – 1:3:0,4.

Для обрання оптимального співвідношення робочої комбінації прянощів використано дескрипторно-профільний метод. Результати сенсорного оцінювання досліджуваних композицій за бальною шкалою відповідно обраних дескрипторів засвідчили, що найкращі результати має зразок № 2, а саме співвідношення бодян: кориця: кардамон як 1:2:0,6.

При розроблені рецептури аюрведичного зефіру до традиційної рецептури окрім настою композиції прянощів запропоновано внесення порошоків морквяного та куркуми. В дослідженнях використано 5 зразків модельних рецептур аюрведичного зефіру, лідером є зразок № 4, рецептура якого і є новим кондитерським виробом.

Отже встановлено, що для отримання аюрведичного зефіру до традиційної рецептури зефіру вносять – настій композиції прянощів, в кількості 20 см³ на 100 г рецептури, морквяний порошок в кількості 2,5% рецептурного складу, порошок куркуми у кількості 0,05 та 0,02%.

В таблиці 4 розміщено органолептична характеристика аюрведичного зефіру.

Таблиця 4

Характеристика зразка аюрведичного зефіру

Найменування показника	Характеристика
Форма	Кругла, дещо приплюснута
Поверхня	Рифлена, не липка, з чітким малюнком
Колір	Ніжно жовтий
Смак	Солодкий з нотками кардамону та після смаком куркуми
Аромат	Приємно пряний з нотками куркуми, бодяна та кардамону

В таблиці 5 показано впливовість складників аюрведичного зефіру на Доші людини. В – Вата Доша, П – Пітта Доша, К – Капха Доша, ↓ – приведення до балансу, ↑ – підсилення дисбалансу.

Під час вибору овочевої сировини для дієтичної овочевої ікри керувалися такими вимогами: сировина має містити максимальну кількість БАР з гіпоглікемічними, гіполіпідемічними, антитоксичними, антиоксидантними властивостями, бути високої якості, економічно доцільною.

На підставі сформульованих вимог обрано: бульби топінамбура, які містять інουλін, що має гіпоглікемічні властивості, моркву та гарбуз, кабачок які проявляють антиоксидантні та антитоксичні властивості.

В новій рецептурі відносно традиційної запропоновано замінити баклажан на гарбуз та топінамбур, враховуючи кращий мінеральний склад та ціну сировинного набору. Враховуючи температурні режими зберігання, топінамбур та гарбуз можуть зберігатись довший термін та без холодильної камери, чого не можна зазначити про баклажан.

За дегустаційною оцінкою найвищі дегустаційні оцінки отримав зразок, який містить пюре топінамбура в продукті на рівні 30%, а решту компонентів можна варіювати в межах 0..50% від маси суміші.

За зовнішнім виглядом ікра овочева це пластична маса з допустимими включеннями зелені та/або прянощів, без грубого насіння перестиглих овочів.

У більшій досліджуваних зразків консистенція ікри м'яка, ніжна та злегка зерниста. Колір ікри однорідний по всій масі, від світло-жовтого до

Таблиця 5

Вплив основних складників нової рецептури на Доші людини

Сировина	Смак (Раса)	Вірья	Віпак	Баланс Дош
Яблучне пюре	Солодкий, в'язучий	Охолоджуючий	Солодкий	В ↓ П ↓, К ↑
Бодян	в'язучий, гострий	Зігрівач	Солодкий	В ↑ К ↓, П ↓
Куркума	Гірка, в'язка, гостра	Гаряча	Гостра	В ↑, К ↓ П ↑
Морквяний порошок	Солодкий, гострий	Гаряча	Гострий	В ↓, К ↓ П ↑
Кориця	Солодкий гіркий, гострий	Гаряча	Солодка	В ↓ П ↓, К ↓
Кардамон	Солодкий, гострий	Зігрівач	Солодкий	В ↓ К ↓, П ↑ в надлишку

жовтого, в окремих випадках потемніння поверхневого шару не перевищує 4 мм.

Отримані дослідні зразки ікри овочевої було досліджено за фізико-хімічними показниками (таблиця 6) та визначено відповідність ДСТУ 3797-98 Консерви. Ікра овочева. Технічні умови. Зі Зміною № 1 (ПС № 5-2002).

Таблиця 6
Фізико-хімічні показники якості овочевої ікри

Найменування показника	Контроль	Дістична ікра
Масова частка сухих речовин, %	19,8+0,41	17,8+0,41
Масова частка жиру, %	7,5+0,11	7,2+0,11
Масова частка титрованих кислот, %	0,2+0,05	0,2+0,05
Якість подрібнення: кількість частинок м'якоті розміром понад 150мкм, %	11	13

Отримані результати бальної оцінки якості ікри овочевої представлені в таблиці 7.

Була розроблена технологія приготування овочевої ікри під назвою «Позитив» та оформлена у вигляді технологічної схеми.

Встановлено, що максимальний термін придатності 30 діб в закладах гостинності, якщо

Таблиця 7

Органолептичні показники якості ікри овочевої

Показник	Норми відповідно до бальної шкали	Фактичні результати
Зовнішній вигляд, бал	0,2-0,5	0,46+0,05
Консистенція, бал	0,6-1,5	1,35+0,15
Колір, бал	0,2-0,5	0,47+0,05
Запах, бал	0,4-1	0,96+0,08
Смак, бал	0,6-1,5	1,47+0,09

в закладі не передбачено автоклав, для консервування страв та виробів.

Висновки. Виходячи з вимог споживачів, питання формування асортименту харчової продукції набувають дедалі більшої актуальності та соціальної значущості У представленій роботі, на основі теоретичного аналізу та експериментальних досліджень, запропоновано рішення нового рецептурного складу узвару з фітокомпозицією прянощів, аюрведичного зефіру для рівноважного стану людей різних конституційних пріоритетів, ікри з овочів на основі місцевої сировини з урахуванням вимог до якості та оздоровчої спрямованості.

Список літератури:

1. Сімахіна Г.О., Українець А.І. Інноваційні технології та продукти. Оздоровче харчування. К.: НУХТ, 2010. 294 с.
2. Traditional and ayurvedic foods of Indian origin /Sarkar P., Lohith K.D.H., Dhupal S., Panigrahi S.S., Choudhary R. (2015) Journal of Ethnic Foods, 2 (3) , pp. 97–109.
3. Нові класи інгредієнтів продуктів харчування та їхні функціональні властивості. URL: <https://www.medved.kiev.ua/web.../3-4.../str61.pdf> (дата звернення 29.01.2024).
4. Традиційна їжа: концепція, біологічно активні компоненти, їх потенційний вплив на здоров'я людини / М. Р. Мудрик, Т. М. Сакалош, Л. М. Бугина та ін. // Науковий вісник Ужгородського університету : Серія: Медицина / голов. ред. А.С.Головацький. Ужгород : Видавництво УжНУ «Говерла», 2015. Вип. 37. С. 113–119.
5. Аналіз ринку кондитерських виробів в Україні. 2021 рік. URL: <https://pro-consulting.ua/ua/issledovanie-rynka/analiz-rynka-konditerskih-izdelij-v-ukraine-2021-god> (дата звернення 31.01.2024).
6. Н.Фролова, Байбак С.В., Коваленко О.П., Кучерявий І.А. Розробка технології чайних напоїв відповідно до приписів аюрведичної кулінарії/ Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021, № 1, Т. 32(71), Ч. 2.
7. 5 причин їсти фрукти та овочі 5 разів на день. Вчені навели нові факти. URL: <https://klopotenko.com/5-prychyn-yisty-frukty-ta-ovochi-5-raziv-na-den-vcheni-naveli-novi-fakty/> (дата звернення 27.01.2024).
8. Практичний посібник науки Аюрведи. Загальний poradnik для здорового життя/Ачар'я Балкришна – Переклад з англійської Ганни Яновської, 2020, 474 с.
9. Національний інститут алергії та інфекційних захворювань США. URL: <https://kpi.ua/2019-11-20> (дата звернення 30.01.2024).
10. Застуда - Вірусні захворювання - Інфекційні хвороби. URL: <https://empendium.com/ua/chapter/B27.P.18.1.2> (дата звернення 01.02.2024).
11. Лікарські рослини і фітотерапія (фітотерапевтична рецептура): навч.посіб. /Л.В. Бензель, Р.С. Дармограй, П.В. Олійник, І.Л. Бензель. К.: ВСВ «Медицина», 2020. 400 с
12. Фролова, Н. Е., Науменко, К. А., Петруша, О. О., & Федоренко, О. В. (2015). Оцінка якості екстрактів з нетрадиційної рослинної сировини. /Східно-Європейський журнал передових технологій, 4(10 (76)), 49–54.

13. Користь і шкода солодкого. URL: http://4ua.co.ua/medicine/vb2bc78b5d43a89421316c27_0.html (дата звернення 02.02.2024).

14. Савіцька, А. О. Розроблення технології аюрведичного мармеладу з прянощами : кваліфікаційна робота магістра: 181 Харчові технології / Анастасія Олегівна Савіцька ; наук. керівник Наталія Михайлівна Ющенко. Київ, 2022. 147 с.

15. Продукти переробки плодів і овочів: класифікація асортименту, особливості харчової цінності та хімічного складу, оцінки якості. Умови та термін зберігання. URL: <http://um.co.ua/1/1-2/1-27403.html> (дата звернення 02.02.2024).

16. Спосіб виробництва кабачків в аличевому соку. URL: <https://uapatents.com/5-71569-sposib-virobництва-kabachkiv-v-alichevomu-soku.html> (дата звернення 02.02.2024).

17. Сімахіна Г.О. Біологічно активні речовини в харчових технологіях. Г.О. Сімахіна, Н.О. Стеценко, Н.В. Науменко - Київ: НУХТ, 2016. 455 с.

Frolova N.E., Vorona Yu.V., Vyshnevskaya L.V., Bobin M.A. DEVELOPMENT OF DIETARY AND AYURVEDIC DISHES FOR RESTAURANT BUSINESS ESTABLISHMENTS

Combining the recommendations of dietary and Ayurvedic nutrition, modern provisions of the science of healthy nutrition, masters of the professional educational program "Technology of Dietary and Ayurvedic Food Products" of the National University of Food Technologies have developed dietary and Ayurvedic dishes based on natural raw materials. The composition of the new dishes is substantiated: dietary broth with herbal composition, Ayurvedic marshmallows with spices and carrot powder, vegetable caviar from Jerusalem artichoke, pumpkin and zucchini.

Optimal extraction modes of the experimental phytocomposition of echinacea purpurea, stevia and peppermint in a ratio of 2:1:1 were established to maximize the extraction of antioxidant bioactive substances. The technology of the compound containing apples, dried pears, prunes, raisins with the extract of phytocomposition was developed.

Ayurvedic marshmallows balancing the state of people of Vata Dosha, Pitta Dosha, Kapha Dosha constitutions contain the following additional ingredients to the traditional recipe: carrot powder in the amount of 2.5% of the composition. as well as spices: star anise, cinnamon, cardamom, with the optimal ratio of the combination, namely 1:2:0.6. Ayurvedic marshmallows have a pale yellow color, sweet taste with notes of cardamom and an aftertaste of cinnamon. The aroma is pleasantly spicy with notes of cinnamon, star anise and cardamom.

The composition of vegetable caviar for baby food has been developed and optimized, taking into account the daily requirement for functional ingredients: Marble pumpkin, Jerusalem artichoke, and Kurnek zucchini were chosen as raw materials. The optimal modes of microwave treatment of plant materials were determined: for Jerusalem artichoke, specific power – 450 W/dm³, duration 4.5 minutes; for pumpkin – 600 W/dm³, duration 3.5 minutes.

The conducted research on dietary and Ayurvedic dishes will contribute to a healthy diet of Ukrainians. The range of products of restaurant establishments will be expanded. Draw attention to Ayurveda by spreading Ayurvedic knowledge in Ukraine.

Key words: *spicy and aromatic raw materials, phytoextract, broth, Ayurveda, marshmallows, Jerusalem artichoke, vegetable caviar.*

ТРАНСПОРТ

УДК 656.223.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/22>

Бех Я.П.

Український державний університет науки і технологій

Бех П.В.

Український державний університет науки і технологій

Лашков О.В.

Український державний університет науки і технологій

Кузьменко А.І.

Університет митної справи та фінансів

МЕТОДИ ЗАСТОСУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ ВАНТАЖНОЇ РОБОТИ ЗАЛІЗНИЧНОГО ПОЛІГОНУ

Сучасні вимоги (мається на увазі умови мирного часу) до організації перевізного процесу та якості залізничних перевезень диктують необхідність застосування нових організаційних та технологічних рішень в управлінні перевезеннями, що базуються на широкому впровадженні комплексних інформаційних систем. Розробка та впровадження таких інформаційних систем спрямована на покращення роботи залізничного транспорту та скорочення експлуатаційних витрат. Однією з них є автоматизована система керування перевізним процесом вантажних перевезень на залізничному транспорті, що включає широке коло завдань, в тому числі завдання оперативного управління місцевою роботою залізниць.

До комплексних заходів, що вимагають розробки для покращення оперативного керування перевізним процесом у частині місцевої роботи, належать: уточнення параметрів змінно-добового планування вантажної роботи залізниць, регулювання порожніх вагонів; забезпечення системного підходу до вирішення завдань змінно-добового планування вантажної роботи; формування єдиної моделі (вагонної, поїзної, локомотивної) та бази даних для вирішення завдань поточного планування місцевої роботи на залізничному полігоні; теоретичні аспекти удосконалення системи автоматизованого оперативного управління перевізним процесом у частині місцевої роботи на залізниці, що забезпечує централізоване оперативне планування, диспетчерське керівництво, контроль та аналіз місцевої роботи на основі формування єдиної бази даних та використання створюваних локальних системних мереж.

Разом з цим, на сьогоднішній день створена достатня інформаційна база, що має всі необхідні параметри для якісного вирішення завдань оперативного управління місцевою роботою. Розвиток динамічних моделей лінійного та мережевого рівня (поїзної, вагонної, локомотивної, бригадної та відправної), формування бази заявок вантажовідправників на навантаження, визначають саму необхідність переходу від управління перевізним процесом «за усередненими показниками» до логістичного управління. При такому управлінні, як об'єкт впливу виступають кожен вагон, група вагонів, поїзд, локомотив, бригада, що мають конкретні атрибути та параметри, а кожне прийняте рішення має економічне обґрунтування.

Тому розробка заходів щодо створення комплексної методики та раціоналізації параметрів оперативного планування місцевої роботи залізниць має важливе значення; дозволяє більш аргументовано вирішувати завдання планування та управління.

Ключові слова: автоматизована система управління, залізничний полігон, вантажна робота, оперативне планування, місцева робота.

Постановка проблеми. У довоєнний час, близько 30% від загальної суми виплат залізниці, були пов'язані з недосконалим рівнем планування та управління перевезеннями, в тому числі з перевищенням термінів доставки вантажів, невиконанням прийнятих заявок на перевезення вантажів при не подачі вагонів. Понад 30% випадків перевищення термінів доставки вантажів пов'язані з несвоєчасним відправленням завантажених вагонів та розвезенням вагонів під розвантаження. Відбувається зниження чистого доходу залізниць від реалізації послуг на 17%, що вказує на низьку конкурентоспроможність в динамічному середовищі. Сума чистого збитку АТ «Укрзалізниця» становила 11772346 тис. грн. у 2020 році, що вказує на деградацію компанії та недостатню якість поточної бізнес-моделі. Спостерігається зниження фінансової незалежності компанії, про що свідчить динаміка коефіцієнта фінансової автономії. На кінець 2020 р. підприємство спроможне самостійно профінансувати лише 77,62% своїх активів [9].

Також, основними недоліками для суб'єктів господарювання є:

- обмежений доступ до отримання вагонів, їх нерівномірний розподіл між вантажовідправниками;

- незадовільна реалізація заявок щодо забезпечення вагонами (діє фактор вибіркового ставлення під час розподілу вагонів між промисловими підприємствами регіону);

- порушення термінів доставки: вагони, які за нормативним строком доставки повинні перебувати в дорозі 7–8 днів, фактично можуть прямувати в пункт призначення протягом 20 діб. Також вагони простоюють тижнями на проміжних станціях у «кинутих поїздах», як наслідок, порушуються терміни доставки вантажу за контрактами, що тягне за собою штрафні санкції від покупців, псування вантажу під час перевезення, вимушене повернення вантажу на станцію навантаження;

- АТ «Укрзалізниця» першочергово забезпечує доступ до об'єктів інфраструктури (накопичення на сортувальних станціях, рух шляхами загального користування, подавання/збирання на/із навантажувально-розантажувальних місць, ремонт вагонів) рухомого складу АТ «Укрзалізниця» без урахування потреб у послугах та прав інших замовників послуг щодо доступу до об'єктів інфраструктури;

- недосконале планування перевезень – підтвержені АТ «Укрзалізниця» обсяги перевезень до початку періоду часто не збігаються з фактич-

ним виконанням заявок вантажовідправників; відсутність гарантій щодо виконання заявок на забезпечення рухомим складом та штрафних санкцій, у разі їх невиконання. Забезпечення вагонами здійснюється залежно від технічної можливості АТ «Укрзалізниця», має несистемний та ситуативний характер;

- введення конвекційних обмежень (заборон) на перевезення залізницями, на окремих станціях та напрямках, закриття (призупинення роботи) працюючих станцій, обґрунтовуючи зазначене їх нерентабельністю [10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні аспекти присвячені вдосконаленню організації місцевої роботи за рахунок: об'єднання та узгодження в єдине ціле робіт ділянок, станцій, локомотивних депо, пунктів огляду та ремонту вагонів та інших підрозділів, пов'язаних з рухом поїздів наведені в [6]; технологічних процесів для конкретних станцій, з урахуванням їхньої специфіки в [4]; скорочення простою місцевих вагонів на станціях навантаження та вивантаження в [2]; технології роботи з твердими нитками в [3]; оптимізації управління перевізним процесом в оперативних умовах за допомогою АСУ в [8]; застосування автоматизованих інформаційних систем та технологій з вказаних питань в [1, 5, 7].

Однак, в сучасних умовах, потрібен комплексний (технологічний, економічний та правовий) підхід, що дозволяє знімати витратну складову перевезень.

Важливою умовою організації місцевої роботи є удосконалення технічних та економічних показників використання місцевих вагонів та локомотивів, які брали участь у місцевій роботі.

У комплексі заходів щодо вдосконалення місцевої роботи важливе місце належить раціональній технології роботи вантажних станцій. Основними елементами прогресивної технології роботи станцій слід вважати: внутрішньостанційний графік маневрової роботи; систему взаємної інформації між станцією та під'їзними коліями; диспетчерське керівництво маневровою роботою, номерний облік вагонів районами та під'їзними коліями; поточне оперативне планування місцевої роботи за періодами використання нормативів та ведення аналізу роботи станції.

Метою статті є впровадження єдиного методичного підходу до питань оперативного управління місцевою роботою шляхом удосконалення автоматизованої системи керування місцевою роботою (АСК МР). При запропонованому підході забезпечується не просто розв'язання в кож-

ній підсистемі завдань, що належать до того чи іншого елементу процесу оперативного управління, а й регламентна інформаційна взаємодія між підсистемами під час ітераційного процесу розв'язання.

Розробка технологічної моделі вирішення задач функціонального складу системи, опис технологічних та інформаційних взаємозв'язків між завданнями, методику та оцінку ефективності удосконалення (АСК МР) на полігоні

Виклад основного матеріалу. Існуюча система оперативного планування вантажної роботи включає складання планів навантаження та вивантаження по станціях керованого полігону на наступну добу та зміну. Система змінно-добового планування вантажної роботи полігону може бути представлена у вигляді структури, що наведена на рис. 1.



Рис. 1. Структура системи змінно-добового планування вантажної роботи полігону

Аналіз показує, що за наявності достатнього рівня інформаційного забезпечення, на підставі даних поїзної та вагонної моделей, що містять інформацію про вагони з їх основними атрибутами, їх дислокацію та операції, що з ними проводяться, можливо з високою часткою точності здійснювати пономерне прогнозування вивантаження та утворення завантажувальних ресурсів за періодами доби.

Разом з цим виникає необхідність вирішення завдання пономерного використання вантажних ресурсів – огляду та підготовки їх під навантаження, розподіл за пунктами навантаження за заявками відправників вантажу. Відповідність кожного ресурсу заявці відправника вантажу на навантаження визначається набором наступних критеріїв:

– правила використання рухомого складу (допустимі регіони курсування), станції навантаження та вивантаження, вантажовідправники та вантажоодержувачі, роди вантажів, що перевозяться);

– технічний стан вагона (за величиною залишкового пробігу вагона до наступного планового ремонту) для перевезення вантажів у межах залізниці, України та країн ЄС;

– попутне навантаження порожніх вагонів, що повертаються до держав-власників у складі вантажних поїздів, відповідно до Правил експлуатації, пономерного обліку та розрахунків за користування вантажними вагонами власності інших держав;

– комерційний стан вагону, його екіпірування та підготовка для перевезення заявленого роду вантажу.

Процес отримання інформації для оцінки вагона під заявку за заданими критеріями досить тривалий за часом, оскільки ця інформація не зосереджена в однієї плануючої особи. Тому функції формування та видаванням для станцій завдань на огляд вагонів під навантаження на залізничному перегоні, реєстрація результатів огляду та відбору вагонів вимагають централізованого підходу з концентрацією плануючих функцій у диспетчерів-вагонорозподільників.

Враховуючи вищевикладене, чітко видна необхідність відповідності методів змінно-добового планування та реалізованого (і перспективного) базису інформаційних технологій лінійного і управлінського рівня.

В укрупненому вигляді, завдання раціональної організації змінно-добового планування вантажної роботи полігону формулюються наступним чином:

– полігон управління – залізничний полігон;
 – основні параметри ділянок та станцій полігону (технічні, технологічні, тимчасові);
 – встановлена для полігону технологія просування місцевого вантажу, огляду та підготовки рухомого складу під навантаження, роботи з власним та орендованим рухомим складом, правила завантаження вагонів власності інших залізничних адміністрацій у попутному слідуванні.

Потрібно вибрати ефективні послідовність і порядок вирішення завдань у системі змінно-добового планування вантажної роботи залізничного полігону. Критеріями ефективності обрання рішень повинні бути:

– зниження обороту вагона на полігоні в цілому та за окремими елементами, та робочого парку місцевих вагонів на залізниці, в тому числі резервного парку для забезпечення навантаження на кожен добу;

– повнота забезпечення заявок вантажовідправників на навантаження.

З урахуванням особливостей оперативного управління місцевою роботою на залізницях у сучасних умовах сформульована математична постановка та обрані методи вирішення задач змінно-добового планування вантажної роботи залізничного полігону.

Є розрахунковий полігон PLG , що наведений на рис. 2.

Він описується графом $G_k = \{V_k; R_k\}$, (1)

де V_k – усі v_k -ті вершини графа;

R_k – усі r_k -ті ребра графа;

k – порядковий номер вершини чи ребра у графі.

При цьому кожна вершина v_k може значити S_x^{BC} , S_{xy}^{OC} , S_{xyz}^{np} , S_{xu}^{ct} .

Якщо $V_k \in RMR_{S_k^{bc}}$, (2)

$v_k = S_x^{BC}$ або $v_k = S_{xy}^{OC}$, або $v_k = S_{xyz}^{np}$, або $v_k = S_{xu}^{ct}$,

де S_x^{BC} – базова технічна станція (сортувальна, велика дільнична або вантажна), що здійснює формування та розформування місцевих поїздів для розвезення та концентрації на ній місцевого вантажу полігону $RMR_{S_k^{bc}}$;

S_{xy}^{OC} – опорна станція (як правило, велика проміжна або дільнична станція), що є станцією роботи або розформування місцевих поїздів, що формуються базовою станцією, і здійснює розвезення та подачу-прибирання вагонів на прикрі-

плени до неї станції та їх вантажні фронти своїми маневровими локомотивами;

S_{xyz}^{np} – опорна проміжна станція, на якій проводиться вантажні операції, що не має своїх маневрових локомотивів та обслуговується маневровими локомотивами опорної станції;

S_{xu}^{ct} – стиковий пункт полігону з сусідніми полігонами, може бути опорною або проміжною станцією, в цьому випадку $S_{xu}^{ct} = S_{xy}^{OC}$ або $S_{xu}^{ct} = S_{xyz}^{np}$;

$RMR_{S_k^{bc}}$ – район місцевої роботи базової станції S_x^{BC} залізничного полігону, в склад якого входять одна базова станція, b_{LR} опорних станцій (B_{ij}), c_S^{OC} проміжних малодіяльних станцій (C_{ijk}) і d_{LR} стикових пунктів розрахункового полігону (D_{im});

x – найменування базової технічної станції;

y – найменування опорної станції, що знаходиться в районі місцевої роботи базової станції S_x^{BC} ;

z – найменування прикріпленої станції, що знаходиться в районі місцевої роботи базової станції S_x^{BC} та в зоні обслуговування опорної станції S_{xy}^{OC} ;

u – найменування стикового пункту полігону.

Кожній вершині графа зіставляється певний набір параметрів:

$V_k = \{K_S, F_S, M_S^{man}, S_S^{OC}, S_S^{cm}, S_S^{ITTO,PKO}, S_S^{nnc}, S_S^{np}, D_k^V\}$, (3)

де K_S – відповідно безліч вантажовідправників або вантажоодержувачів станції S з ознаками

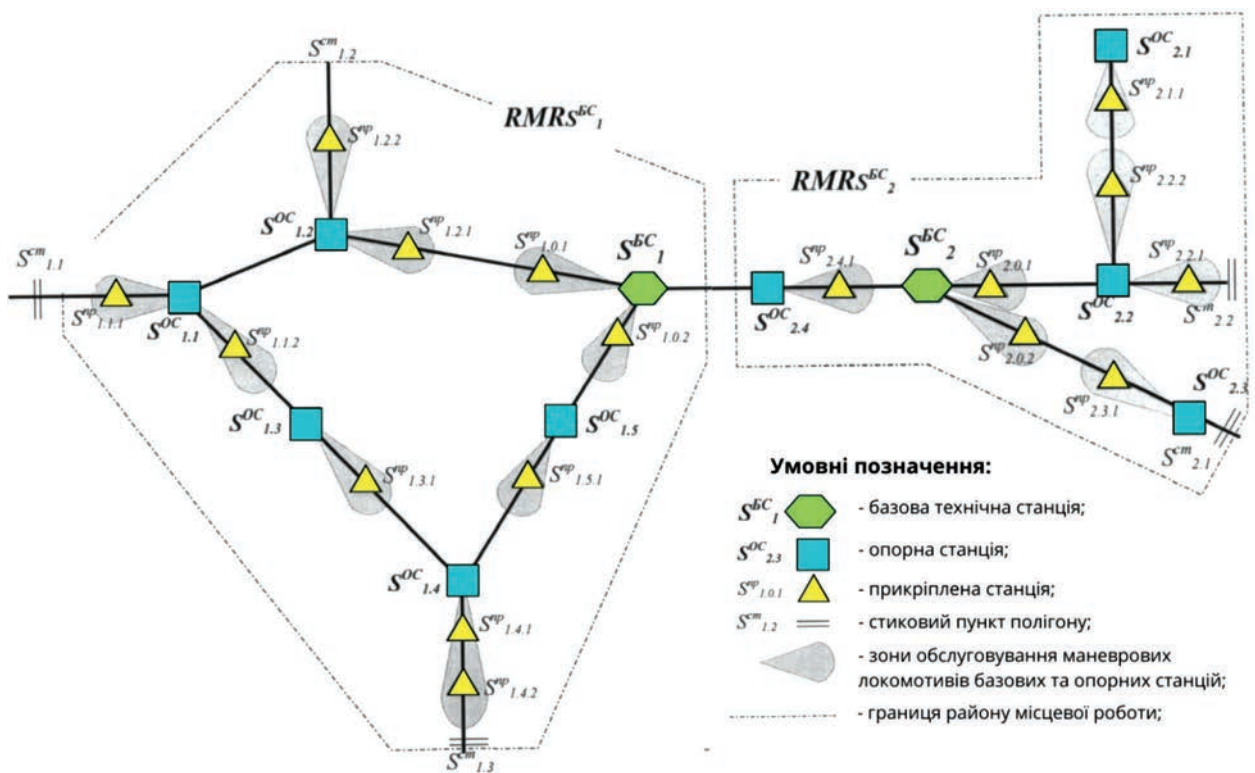


Рис. 2. Схема розрахункового залізничного полігону з виділенням районів місцевої роботи, базових технічних, опорних, прикріплених і стикових станцій

навантаження (вивантаження) на під'їзних коліях, а також орендарів вантажних фронтів у місцях загального користування;

F_S – множина вантажних фронтів станції S ;
 $M_S^{ман}$ – кількість приписаних до станції S маневрових локомотивів, зайнятих в місцевій роботі, ман.лок;
 S_S^{OC} – кількість опорних станцій, що входять в район місцевої роботи базової станції (тільки при $V_k = S_x^{BC}$);
 S_S^{cm} – кількість стикових пунктів розрахункового полігону, що входять в район місцевої роботи (тільки при $V_k = S_x^{BC}$);
 $S_S^{ПТО,ПКО}$ – станції технічного та комерційного огляду під навантаження вагонів, що дислокуються на момент розрахунку або вивантажуються на даній станції, при цьому, якщо пункти технічного та комерційного огляду розташовуються на даній станції, то $S = S_S^{ПТО,ПКО}$;
 $S_S^{нас}$ – станція S підготовки вагонів певного роду під навантаження для неї;
 S_S^{np} – кількість проміжних станцій для кожної опорної станції в зоні обслуговування її маневрових локомотивів (при $V_k = S_x^{BC}, S_{xy}^{OC}$);
 D_k^v – множина тимчасових параметрів на виконання технологічних операцій з поїздами та вагонами, годин.

Для кожного ребра $R_k = \{L_R, v_R^\mu, D_R^\mu\}$, (4)
де L_R – довжина ділянки, що обмежена станціями (вершинами) V_k , км;

v_R^μ – дільнична швидкість прямування вантажних місцевих поїздів різних категорій μ по дільниці, км/год;

D_R^μ – технологічний час прямування по ділянці R_k поїздів категорії μ , годин ($D_R^\mu = L_R / v_R^\mu$).

При цьому $D_R^\mu = f(GPI)$. (5)

Нормативи часу технологічного процесу обробки складів і вагонів по кожній станції полігону:

$$D_S^v = \{t_{III}, t_{розф}, t_{зф}, t_{ПВ}, t_{mn}^a, t_{mn}^n, t_{mn}^{en}, t_{nz}^f, t_{об}^f, t_{e.on}^f\}, \quad (6)$$

де t_{III} – норматив часу технологічної обробки складу поїзда в парку приймання або по прибуттю на приймально-відправних коліях;

$t_{розф}$ – норматив часу на розформування складу поїзда або передачі;

$t_{зф}$ – норматив часу закінченню формування;

$t_{ПВ}$ – норматив часу технологічної обробки складу поїзда в парку відправлення, сортувально-відправному або на приймально-відправних коліях;

$t_{mn}^a, t_{mn}^n, t_{mn}^{en}$ – норматив часу технологічної обробки місцевих поїздів відповідно з відчепленням, причепленням, відчепленням і причепленням груп;

t_{nz}^f – норматив часу на подачу й забирання вагонів на f вантажний фронт;

$t_{об}^f$ – норматив часу на обробку фронтів (перестановку вагонів на кожний вантажний фронт);

$t_{e.on}^f$ – норматив часу простою вагонів під однією вантажною операцією на кожному вантажному фронті.

Час на накопичення складу місцевого поїзда або передачі на проміжну станцію маневровими локомотивами опорної станції

$$t_{нак}^i = f(GPI, N^i), \quad (7)$$

де N^i – добовий вагонопотік місцевих вагонів призначенням i , ваг/добу.

Необхідно виконати:

– розрахунок плану вивантаження ($PL_{вив}^T$);

– прогнозування створення навантажувальних ресурсів ($PL_{нав.рес}^T$);

– забезпечити заявки вантажовідправників навантажувальними ресурсами шляхом пономерного прикріплення вагонів до заявок та сформувати план навантаження ($PL_{нав}^T$), на основі аналітичного оцінювання придатності вагонів та за результатами ПТО та ПКО;

– розрахунок заявки для верхнього рівня ієрархії управління перевізним процесом на підведення порожніх вагонів на станціях розрахункового полігону ($PL_{з.рес}^T$).

План вивантаження має бути визначений як пономерний перелік вагонів, які встигнуть за наступну добу прибути на станції вивантаження та вивантажитись на під'їзних коліях та в місцях загального користування

$$PL_{вив}^T = \sum N_{вив}^T, \quad (8)$$

де $\sum N_{вив}^T$ – всі вагони, що включені в план навантаження та для яких є вірним вираз:

$$T^{nom} + D_m^{N_i} \leq T_{зак.роб}^{f_k}, \quad (9)$$

де T^{nom} – поточний час розрахунку плану вивантаження, (дата, час);

$T_{зак.роб}^{f_k}$ – час закінчення роботи f_k вантажного фронту;

$D_m^{N_i}$ – технологічний час просування вагону від місця дислокації його на момент часу T^{nom} , до розвантажувального фронту та вивантаження вагону, год.

Таким чином, з усієї маси (множини) вагонів, що ідентифікуються у підході до станцій вивантаження, і на самих станціях вивантаження за умовою (9) формується підмножина вагонів, що підлягають вивантаженню на станціях полігону у планову добу (T).

$$\text{Для всіх } V_k \in RMR, \sum N_{вив}^T \sum_{k=1}^K N_{нідх^k}^{T^{nom}}, \quad (10)$$

де $N_{нідх^k}^{T^{nom}}$ – загальна кількість вагонів, що ідентифікуються у підході до станцій призначення – вершинам V_k розрахункового графа, вагонів.

План (прогноз) утворення навантажувальних ресурсів повинен бути визначений, як під-

множина вагонів, що підлягають вивантаженню. Кількість вагонів, які в планову добу будуть вантажним ресурсом, що утворюється з-під вивантаження, визначається за формулою:

$$PL_{нав.рес}^T = \sum N_{вив}^T - \sum N_{непdx}^T = \sum N_{нав.рес}^T, \quad (11)$$

де $\sum N_{непdx}^T$ – підмножина вагонів, що включені в план вивантаження на добу але з подвійними операціями, для яких виконується умова:

$$T^{nom} + D_m^{N_i} > T_k - (t_{вант}^{сеп, v_k} + 2t_{под}^{сеп, v_k}), \quad (12)$$

де $t_{вант}^{сеп, v_k}$, $2t_{под}^{сеп, v_k}$ – відповідно середній час на виконання вантажних операцій і подачі-забирання вагонів на/з місць навантаження-вивантаження для кожної V_k станції, що є станцією вивантаження вагону $N_{вив}^T$, год;

T_k – час завершення планової доби (терміну).

План навантаження визначається як сума вагонів з числа навантажувальних ресурсів, що пономерне прикріплені до заявок вантажовідправників на навантаження

$$PL_{нав.рес}^T = \sum_{z=1}^Z N_{нав.рес}^{сма, E}, \quad (13)$$

де Z – сума всіх z заявок k вантажовідправників на навантаження на плановий період T , заявок.

В загальному вигляді, заявка для верхніх рівнів ієрархії управління перевізним процесом на підведення порожніх вагонів для повного забезпечення заявок відправників вантажів на навантаження вагонів на станціях розрахункового полігону повинна бути визначена, як сумарна кількість вагонів, необхідних по заявкам вантажовідправників на навантаження, і незабезпечених пономерними прикріпленими ресурсами по результатам розрахунку плану навантаження

$$PL_{з.рес}^T = \sum_{k=1}^K N_z^T - \sum_{z=1}^Z N_{нав.рес}^{сма, E}. \quad (14)$$

Графічна постановка задачі представлена на рис. 3, де множини й підмножини вагонів різних груп, а також заявок вантажовідправників на навантаження позначені багатокутниками.

Вирішення задачі зводиться до пономерного визначення вагонів кожної множини, що описується окремим багатокутником.

Таким чином, пропонується метод оперативного планування вивантаження й навантаження з використання АСУ (в першу чергу – АСУ лінійного рівня). При виборі методик розрахунку плану вивантаження і прикріплення ресурсів до заявок треба додержуватись принципу комплексного підходу до вирішення задач планування, послідовність яких обумовлена вимогами до логістичного управління цілісного процесу. Приклад вирішення у вигляді схеми наведений на рис. 4.

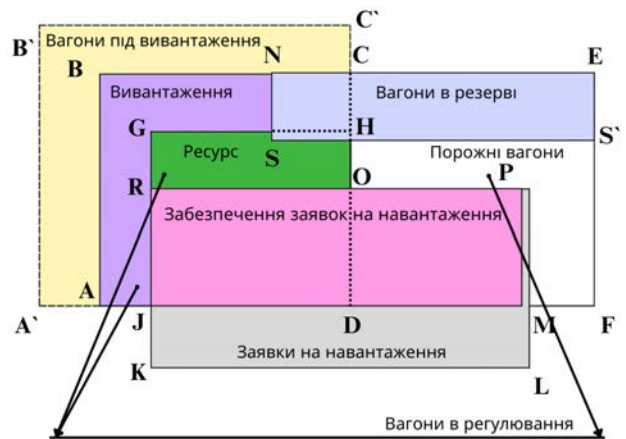


Рис. 3. Графічне відображення математичної постановки задачі планування вантажної роботи на залізничному полігоні

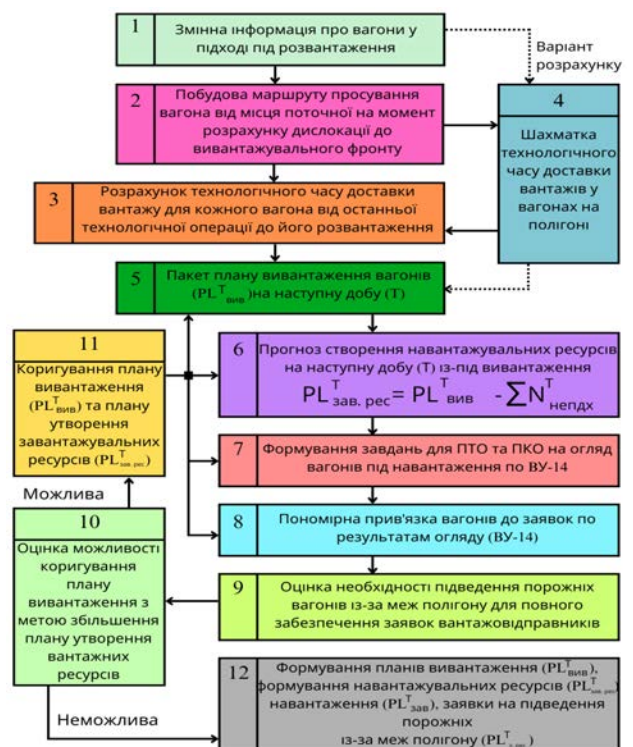


Рис. 4. Принципова схема вирішення задач оперативного планування вантажної роботи полігону

Висновки. Проблеми організації та оперативного управління місцевою роботою на різних рівнях управління приділяється велика увага, але підхід до вирішення проблеми недостатньо комплексний. Зокрема, детально не розглядаються питання запровадження нових методів з використанням АСУ, яка охопила б за своїм функціональним складом усі елементи процесу оперативного управління місцевою роботою, і в архітектурі якої знайшли б формалізацію та рішення, як самі ці елементи, так і функціональні та технологічні

взаємозв'язки між ними. Процес оперативного управління нерозривний і за своєю структурою логістично-послідовний, а сучасні масштаби розвитку та впровадження автоматизованих систем управління дозволяють реалізувати систему управління місцевою роботою.

Удосконалення роботи АСУ, за рахунок впровадження нових методів організації місцевої роботи має забезпечити нерозривний процес розробки та прийняття плануючих рішень з різних горизонтів планування (доба, зміна, 4–6-годинний період), а також управлінський вплив безпосередньо на перевізний процес через АСУ лінійного рівня.

Список літератури:

1. Бульба С. С., Лукова-Чуйко Н. В., Лелет І. В. Система виконання сервісів Укрзалізниці як композитних додатків у розподіленій мережі. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2018. № 2. С. 38–42.
2. Razghonov, S., Lesnokova, I., Khalipova, N., Kuzmenko, A., Kuznetsov, V., Chernikov, D., Zvonarova, O., Prokhorchenko, N., Horulia, M., Bekh, P. Building models to optimize vehicle downtime in multimodal transportation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2023, 3(3(123)), p. 68–76. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.283172>
3. Бех П.В., Стрелко О.Г., Музикін М.І., Нестеренко Г.І. Управління вантажними перевезеннями в умовах ризиків конкурентного середовища. Системи та технології (правонаступник наукового журналу «Вісник Академії митної служби України»). Серія: «Технічні науки», 2021, № 1 (61), с. 85–97.
4. Бех П.В., Лашков О.В., Максименков Є.А., Папахов О.Ю. Дослідження технології роботи пунктів переробки великовагових вантажів. Збірник наукових праць Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна «Транспортні системи та технології перевезень», 2021, № 22, с. 48–55.
5. Жуковицький І.В., Скалозуб В.В., Устинко А.Б. Принципи побудови системи підтримки прийняття рішень і управління вантажними перевезеннями на основі аналітичних серверів АСК ВП УЗ. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Дніпропетровськ, 2007. – № 17. – С. 28–34.
6. Кузьменко А.І., Бех П. В., Лашков О. В., Максименков Є. А. Дослідження впливу потужності вагонопотоків на показники плану формування поїздів. Системи та технології, № 1 (63), 2022, с. 15–39.
7. Лаврухін О. В., Долгополов П. В., Петрушов В. В., Ходаківський О. М. Інформаційні системи та технології при управлінні залізничними перевезеннями: навч. посіб. Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2011. 118 с.
8. Чернецька-Білецька Н. Б., Павлюченко В. О., Кононенко С. В. Аналіз систем автоматизації управління технологічними процесами на станціях залізничного транспорту. Вісник Інженерної академії України. 2013. Вип. 3–4. С. 185–187.
9. «Акціонерне товариство «Українська залізниця»: бухгалтерська звітність і фінансовий аналіз за 2020 р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: https://zvitnist.com/40075815_AKCIONERNE_TOVARYSTVO_UKRAYINSKA_ZALIZNYCYA#analysis. – Назва з екрана.
10. Звіт про результати дослідження ринку перевезення вантажів залізничним транспортом за 2017-2018 роки [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: https://amcu.gov.ua/storage/app/sites/1/Docs/doslidzhennya_rynkiv/%2028%2001%202019.pdf. – Назва з екрана.

Bekh Ya.P., Bekh P.V., Lashkov O.V., Kuzmenko A.I. METHODS OF APPLICATION OF THE AUTOMATED MANAGEMENT SYSTEM FOR THE OPERATIONAL PLANNING OF TRUCK WORK OF THE RAILWAY LANDFILL SITE

Modern requirements (meaning peacetime conditions) for the organization of the transportation process and the quality of rail transportation dictate the need to apply new organizational and technological solutions in transportation management, based on the widespread implementation of complex information systems. The development and implementation of such information systems is aimed at improving the operation of railway transport and reducing operational costs. One of them is an automated system for managing the transportation process of freight transportation by rail, which includes a wide range of tasks, including the task of operational management of local railway operations.

Comprehensive measures requiring development to improve the operational management of the transportation process in the area of local work include: clarification of the parameters of shift-day planning of freight work of railways, regulation of empty wagons; providing a systematic approach to solving the tasks of shift-daily planning of cargo work; formation of a single model (wagon, train, locomotive) and database to solve the tasks of current planning of local work at the railway yard; theoretical aspects of improving the system of automated operational management of the transportation process in the part of local work on the railway, which provides centralized operational planning, dispatching management, control and analysis of local work based on the formation of a single database and the use of local system networks being created.

Along with this, to date, a sufficient information base has been created, which has all the necessary parameters for qualitatively solving the tasks of operational management of local work. The development of dynamic models of the linear and network level (train, car, locomotive, brigade and dispatch), the formation of a database of applications from consignors for loads, determine the very necessity of transition from management of the transportation process «according to averaged indicators» to logistics management. With this type of management, every wagon, group of wagons, train, locomotive, crew, which have specific attributes and parameters, act as an object of influence, and every decision made has an economic justification.

Therefore, the development of measures to create a comprehensive methodology and rationalize the operational planning parameters of the local work of railways is important; allows to solve planning and management tasks in a more reasoned way.

Key words: *automated control system, railway yard, freight work, operational planning, local work.*

УДК 656.6:616-036
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/23>

Бондаренко Ю.А.

Одеський національний морський університет

Онищенко С.П.

Одеський національний морський університет

СТРУКТУРА ТА НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ КОНТЕЙНЕРОПОТОКІВ У СИСТЕМІ МОРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

На відхилення результатів роботи суден-контейнеровозів впливають множина факторів – зміни вартості судового палива, подорожчання суднозаходів у порти та проходження каналів та т.п., що обумовлює комерційні ризики перевізника. Але основним фактором, який впливає на ефективність функціонування контейнерної лінії, є, попит на перевезення, який має ймовірнісну природу. Це, у свою чергу, обумовлює невизначеність контейнеропотоків, які є вантажною базою для суден-контейнеровозів в рамках конкретних ліній. У даному дослідженні у встановлено сутність та структура контейнеропотоків у системі морських перевезень при розгляді їх з різним ступенем деталізації та з урахуванням різних аспектів формування їх структури. Сформовано схему відповідності ступеню агрегованості розгляду контейнеропотоків та розв'язуваних завдань з управління роботою суден-контейнеровозів. Охарактеризовано основні причини перерозподілу контейнерів потоків у системі морських перевезень.

Виконано математичний опис структури контейнеропотоків, який враховує різні аспекти формуванням структури – порти, регіони, товарна група. Встановлено та охарактеризовано основні етапи та фактори впливу та формування невизначеності контейнеропотоків компанії-перевізника – від мінливості світової торгівлі до конкурентного середовища компанії-перевізників у регіоні. Невизначеність контейнеропотоків розглядається у двох варіантах: 1) «статистична невизначеність» – коли є статистика про «поведінку» контейнеропотоків за минулі періоди, що дає можливість встановити параметри закону розподілу та спрогнозувати їх динаміку; 2) «нестатистична невизначеність» – коли можна оцінити можливі значення й відповідні суб'єктивні ймовірності – наприклад, при хаотичному поведінці ринку чи створенні ліній у регіоні, де раніше не було контейнерних сервісів. Отримані результати складають основу для подальших досліджень питання оцінки ефективності роботи суден-контейнеровозів при врахуванні впливу невизначеності контейнеропотоків.

Ключові слова: контейнерні перевезення, ефективність роботи суден, невизначеність, комерційний ризик, відхилення параметрів.

Постановка проблеми. Контейнерні перевезення є значним сегментом ринку морських транспортних послуг, динаміка перевезень вантажів у контейнерах представлена на рис. 1. Судна контейнеровози обслуговують понад 15% світової торгівлі, рис. 2 відображає динаміку часток різних категорій вантажів у структурі морських перевезень.

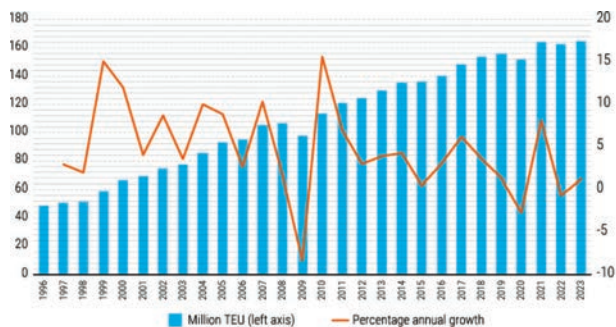


Рис. 1. Динаміка перевезень вантажів у контейнерах (джерело [1])

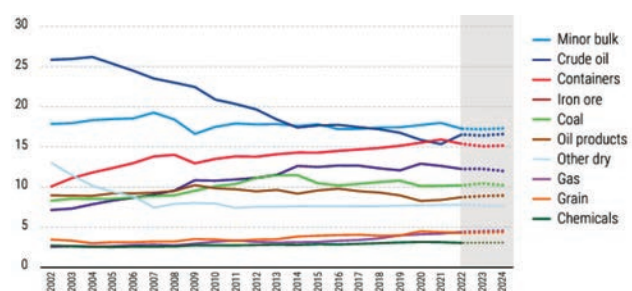


Рис. 2. Частка категорій вантажів у структурі морських перевезень (джерело [1])

Будучи постійно зростаючим сегментом, контейнерні перевезення є предметом бізнес інтересів багатьох компаній, більшість з яких вже мають історію та багато років працює у даному сегменті, деякі компанії тільки намагаються зайняти певну частку ринку. Тому конкуренція на ринку морських контейнерних перевезень достатньо

висока. Крім того, нестабільність у рівні цін на перевезення контейнерів завдяки впливу таких факторів, як політичні події останніх років, дефіцит порожніх контейнерів у деяких географічних сегментах, дисбаланс експортно-імпортних потоків, все це обумовлює необхідність проведення компаніями-перевізниками постійного аналізу ефективності роботи контейнерних сервісів (контейнерних ліній) та корегувати їх, а саме, розклад, порти лінії, судна, які працюють на лінії. Але ж ретроспективний аналіз має бути у комплексі з прогнозами щодо розвитку попиту у даному сегменті для превентивних заходів без очікування падіння ефективності роботи суден та функціонування контейнерного лінійного сервісу. Основним фактором, який впливає на ефективність функціонування контейнерної лінії, є, безумовно, попит на перевезення, який має ймовірнісну природу. Це, у свою чергу, обумовлює невизначеність контейнеропотоків, які є вантажною базою для суден-контейнеровозів в рамках конкретних ліній. Саме невизначеність формує можливі ризики компаній-перевізників, а, в умовах збільшення мінливості ситуації на ринку контейнерних перевезень, це обґрунтовує актуальність досліджень невизначеності контейнеропотоків.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. З урахуванням значимості контейнерних перевезень для світовою торгівлі, звичайно, питанням, пов'язаним з роботою суден, у тому числі, на контейнерних ліній, присвячено достатню кількість публікацій. Сучасні тенденції у судноплаванні, які впливають на ефективність роботи суден будь-якої спеціалізації, полягають у контролі та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище, переходу на нові стандарти технічної експлуатації [2, 3]. Крім того, тенденція автоматизації та цифровізації морських перевезень обґрунтовує нову реальність для усіх учасників процесу доставки вантажів у контейнерах [4], у тому числі, обумовлює новий режим роботи контейнерних терміналів при обслуговуванні суден-контейнеровозів [5], це надає можливості прискорити час перебування суден у портах та впливає на формування розкладу роботи суден. З урахуванням специфіки функціонування лінійного контейнерного сервісу, а саме, наявності стійкого розкладу, за яким працюють судна, значна частка публікацій присвячено саме питанням розкладу, наприклад [6–9], у тому числі, впливу невизначеності на розклад роботи суден [8].

Ймовірнісна природа майже умов транспортного процесу [10], обумовлює окремий напрямок

досліджень впливу невизначеності на параметри виробничого процесу суден [11–15]. Наприклад, розглядалися питання впливу погодних умов на час рейсу суден [13], впливу змін рівня фрахтових ставок та цін на бункер на ефективність роботи суден [11, 12]. З урахуванням зростання розміру суден-контейнеровозів за останні роки окремою задачею є дослідження впливу розміру суден на ефективність їх роботи при впливах невизначеності [14, 15]. Що стосується невизначеності контейнеропотоків, то це питання розглядається відносно до роботи контейнерних терміналів (наприклад, [16, 17]), але ж чомусь як вантажна база суден-контейнеровозів це питання майже не розглядається у наукових публікаціях. Виключення, публікації [18, 19] в яких розроблено методи врахування невизначеності обсягу порожніх контейнерів на лінії [19], та врахуванням впливу невизначеності на розклад роботи суден [18].

Таким чином, можна стверджувати, що вплив невизначеності на роботу суден, у тому числі, на контейнерних лініях, є предметом сучасних досліджень, але ж майже відсутні дослідження природи невизначеності контейнеропотоків та її впливу на ефективність роботи суден на контейнерних лініях. Тому звернення до цих питань пов'язано, з одного боку, з сучасними викликами практики, з іншого – відсутністю відповідної теоретичної бази, що обґрунтовується результатами аналізу сучасних джерел.

З урахуванням вищезазначеного, **метою даного дослідження** є встановлення сутності, структури та характеристики невизначеності контейнеропотоків у системі морських перевезень. Досягнення мети пов'язано з вирішенням наступних завдань: 1) ідентифікація формування контейнеропотоків на різних рівнях їх розгляду; 2) формалізований опис структури контейнеропотоків; 3) характеристика процесу формування та природи невизначеності контейнеропотоків для компанії-перевізника у системі морських перевезень.

Виклад основного матеріалу. Рівноб'язні погляди на формування контейнеропотоків у системі морських перевезень. Для розуміння невизначеності контейнеропотоків у системі морських перевезень слід передусім визначити те, як саме формуються контейнеропотоки і які основні фактори впливають на них. Прийнято вважати, контейнеропотік – це кількість контейнерів (в TEU), що підлягають перевезенню або перевозяться у заданому напрямку в одиницю часу. Одиницею часу може бути тиждень, місяць, квартал, рік, але найчастіше, у завданнях, що з роботою

суден-контейнеровозів логічним є розгляд контейнеропотоків у межах місяця чи року. Рік є прийнятним проміжком часу з метою оцінки ефективності роботи будь-яких підприємств, місячна розбивка контейнеропотоків дозволяє врахувати сезонність перевезень у деяких напрямках. Напрямок перевезення також може бути розглянуто з різним ступенем деталізації – агреговано між регіонами або країнами, або більш деталізовано локально між конкретними портами (рис. 3).

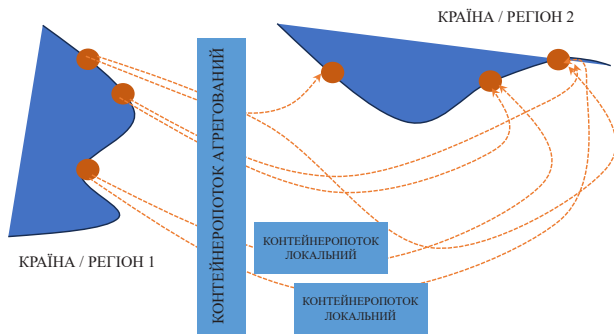


Рис. 3. Варіанти агрегованості контейнеропотоків

Компанія-перевізник, приймаючи різні рішення, пов'язані з роботою суден-контейнеровозів, може розглядати контейнеропотоки як агреговано (по країнах), так і деталізовано, по портах, залежно від специфіки прийнятих рішень та відповідних завдань (рис. 4).

Наприклад, при відкритті нового «сервісу» в країні контейнеропотоки спочатку розглядаються агреговано, щоб компанія могла оцінити свої перспективи роботи на новому ринковому сегменті, а потім, при позитивному рішенні з цього питання компанія здійснює вибір порту, що вимагає вже більш детального розгляду кон-

тейнеропотоків. З урахуванням того, що деталізовані контейнеропотоки формують агреговані, і в будь-якому випадку, деталізовані контейнеропотоки розглядаються при прийнятті рішень щодо управління роботою суден, тому проаналізуємо формування контейнеропотоків із прив'язкою до конкретних портів. Отже, контейнеропотоки у експортному напрямі формуються країни, регіони, і навіть сусідніх країнах, які транзитом здійснюють експортні поставки. Основними чинниками, що впливають обсяг контейнеропотоків є обсяги і структура виробництва та зовнішньої торгівлі регіону, країни, і навіть сусідніх країн чи регіонів (рис. 5).

Крім того, на величину контейнеропотоків впливають конкурентні стратегії портів/контейнерних терміналів, а також їх цінова політика. Дійсно, залежно від «привабливості» контейнерного терміналу компанія-перевізник може віддавати перевагу тому чи іншому порту/терміналу, що особливо актуально для портів і терміналів, які знаходяться на незначній відстані. Наприклад, така ситуація мала місце для українських контейнерних терміналів, з урахуванням близькості Чорноморська та Одеса, і виникали ситуації, коли з різних причин (насамперед, комерційного характеру) контейнерний перевізник віддавав перевагу конкретному порту і «перенаправляв» контейнеропотоки до цього порту. Для більшості вантажовласників Одеса чи Чорноморськ розглядаються як порти-аналоги, тому для них це не мало значення. Отже, конкурентна боротьба портів і терміналів зумовлює перерозподіл контейнеропотоків у подібних випадках (рис. 6). Наприклад, з пункту 2, який «тяжіє» до порту А1, частина вантажів, що формують контейнеропотів для даного порту, можуть переорієнтуватися на порт А2, що,

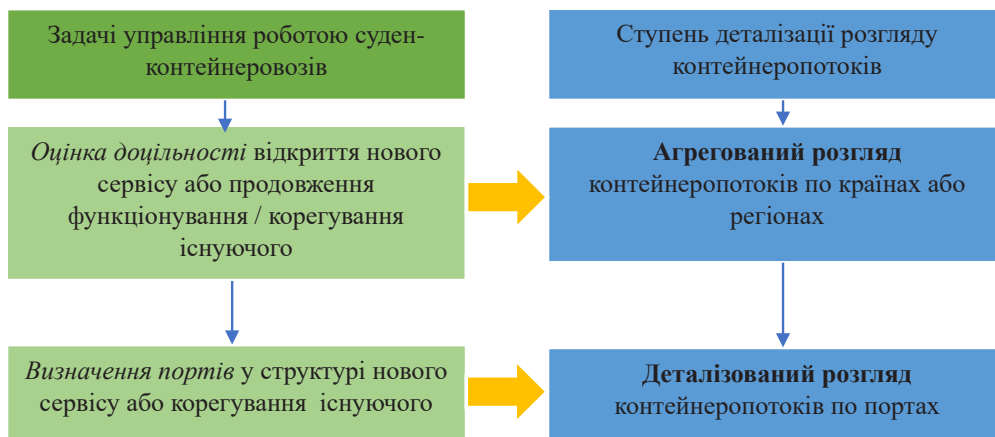


Рис. 4. Ступінь агрегованості розгляду контейнеропотоків залежно від розв'язуваних завдань з управління роботою суден-контейнеровозів

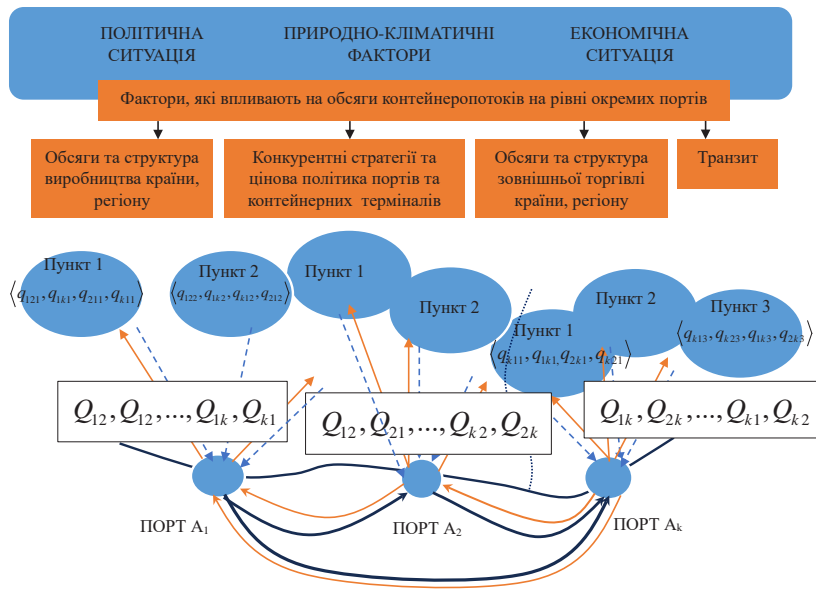


Рис. 5. Формування контейнеропотоків у системі морських перевезень

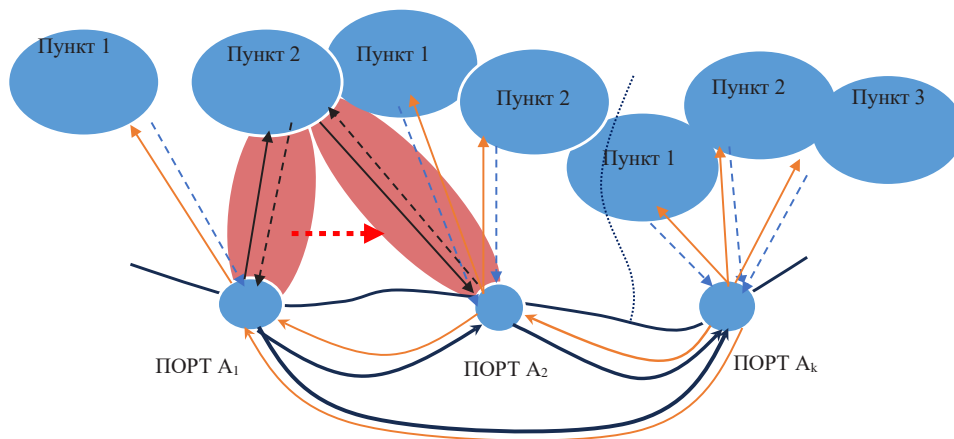


Рис. 6. Перерозподіл контейнерів потоків у системі морських перевезень

природно, призводить до зміни структури та обсягів контейнеропотоків даних портів.

Природно, що на ситуацію з контейнеропотоками на рівні конкретних портів впливає політична та економічна ситуація у відповідних країнах та регіонах. Прикладом може бути переорієнтація контейнеропотоків з українських портів на порт Констанца (Румунія) за умов війни.

Формалізований опис структури контейнеропотоків. Отже, розглянемо множину кореспондуючих портів $\{A_1, A_2, \dots, A_k, \dots, A_K\}$. Обсяги контейнеропотоків між ними у рамках річного відрізка часу позначимо $Q_{ij}, i = \overline{1, K}, j = \overline{1, K}, i \neq j$, що визначає матрицю контейнеропотоків (1) у системі кореспондуючих портів.

$$\begin{pmatrix} 0 & Q_{12} & \dots & Q_{1k} & \dots & Q_{1K} \\ Q_{21} & 0 & \dots & Q_{2k} & \dots & Q_{2K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Q_{k1} & Q_{k2} & \dots & 0 & \dots & Q_{kK} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Q_{K1} & Q_{K2} & \dots & Q_{Kk} & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Q_{ij} и Q_{ji} формують кореспондуючі контейнеропотоки між портами A_i, A_j . Діагональні елементи матриці (1) дорівнюють нулю. Зазначимо, що ненульові елементи (1) є агрегованими величинами з погляду видів вантажів, які перевозяться в контейнерах морем. Тобто:

$$Q_{ij} = \sum_{m=1}^{M_{ij}} Q_{ijm}, \quad (2)$$

де $M_{ij}; i \neq j; i, j = \overline{1, K}$ – кількість видів товарів (товарних груп), що перевозяться між портами i, j ; $Q_{ij1}, Q_{ij2}, \dots, Q_{ijM_{ij}}$ – обсяги контейнеропотоків між портами A_i, A_j з урахуванням їх структури за видами вантажів, що перевозяться.

Q_{ij} є не тільки інтегрованим значенням обсягів контейнеропотоків з точки зору видів товарів, що перевозяться в контейнерах, а також породжених у різних географічних локаціях, що тяжіють до порту A_i . Таким чином:

$$Q_{ij} = \sum_{l=1}^{L_i} q_{ijl}; i, j = \overline{1, K}, i \neq j, \quad (3)$$

де $q_{ijl}; i, j = \overline{1, K}, i \neq j, l = \overline{1, L_i}$ – це обсяг контейнеропотоку між портами A_i, A_j , «зароджуваний» у пункті/регіоні l ; L_i – кількість пунктів – місць зародження контейнеропотоків, що тяжіють (тобто географічно близьких) до порту A_i . q_{ijl} можуть бути також деталізовані за видами вантажів, тобто:

$$q_{ijl} = \sum_{m=1}^{M_{ij}} q_{ijlm}, \quad (4)$$

де $q_{ijlm}, m = \overline{1, M_{ij}}; l = \overline{1, L_i}; i, j = \overline{1, K}, i \neq j$ – обсяг контейнеропотоку, пов'язаного з товаром m з пункту l між портами A_i, A_j . Таким чином:

$$Q_{ij1} = \sum_{l=1}^{L_i} q_{ij1l}, Q_{ij2} = \sum_{l=1}^{L_i} q_{ij2l}, \dots, Q_{ijM_{ij}} = \sum_{l=1}^{L_i} q_{ijM_{ij}l}. \quad (5)$$

Отже:

$$Q_{ij} = \sum_{m=1}^{M_{ij}} Q_{ijm} = \sum_{m=1}^{M_{ij}} \sum_{l=1}^{L_i} q_{ijlm}. \quad (6)$$

Структура контейнеропотоків наведена на рис. 7. Зазначимо, що всі складові наведених вище формул можуть характеризувати обсяги як у ТЕУ, тобто кожен вид товару в контейнеропотоці також оцінений у ТЕУ з урахуванням його транспортної характеристики; або ж у тис.т., що часто використовується в офіційній статистиці.

Отже, представлені вище міркування демонструють складність структури контейнеропотоків, обсяги яких є випадковою величиною, оскільки достовірно охарактеризувати кожен обсяг неможливо через вплив значної кількості факторів, починаючи від факторів макrorівня, до падіння чи підвищення поставок конкретного підприємства, що експортує свою продукцію морем у контейнерах.

Характеристика формування та природи невизначеності контейнеропотоків для компанії-перевізника у системі морських перевезень. Обсяг контейнеропотоків (кількість контейнерів у межах часового періоду) є величиною, яку впливає безліч чинників різної природи, що дозволяє її розглядати як детерміновану. Чітко визначити обсяг контейнеропотоків, як і обсяг світової торгівлі неможливо. Таким чином, виникає ситуація

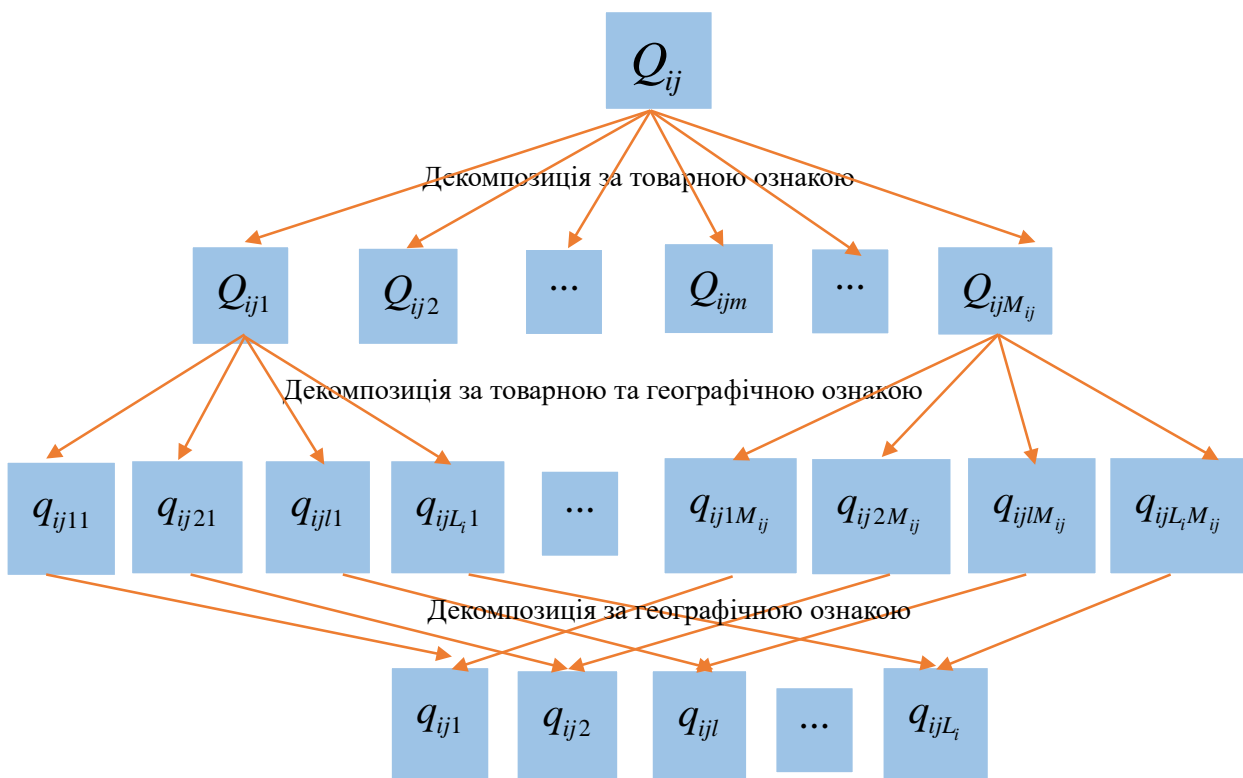


Рис. 7. Структура контейнеропотоків між портами A_i, A_j

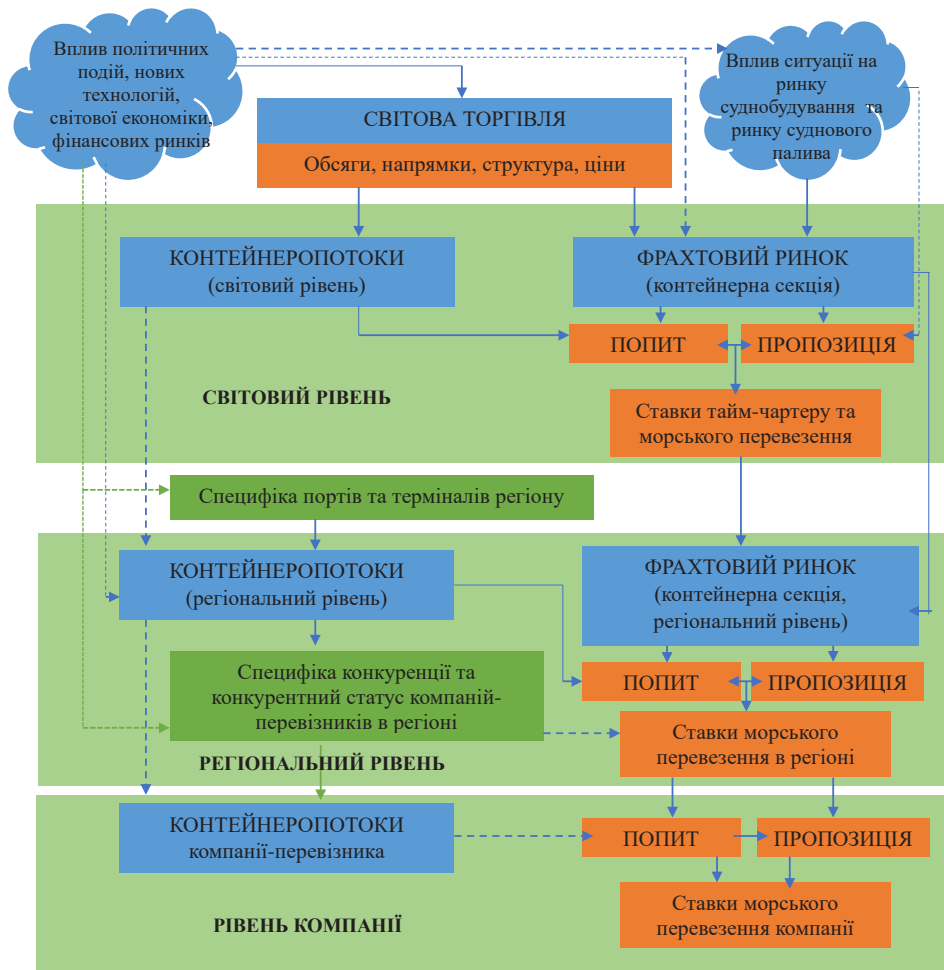


Рис. 8. Багатоетапний процес формування невизначеності контейнеропотоків для компанії-перевізника

невизначеності – неточне або неповне знання про параметри системи морських перевезень вантажів у контейнерах – контейнеропотоків (їх обсяги), а також інші параметри, такі як вартість перевезення, вартість судового палива тощо (рис. 8).

На їхню невизначеність з погляду обсягів, насамперед, впливає множина факторів, починаючи з макrorівня і закінчуючи специфічними умовами конкретного порту та контейнерного терміналу. Тим не менш, для компанії-перевізника до цих факторів ще додаються ті, які пов'язані зі специфікою конкурентного середовища та ситуацією на фрахтовому ринку (контейнерної секції). Саме рівень компанії-перевізника є «підсумковим» у багатоетапному процесі формування невизначеності контейнеропотоків.

Основними передумовами невизначеності контейнеропотоків є:

1) *Недетермінованість* процесів, котрі відбуваються у суспільстві загалом і в економічній діяльності зокрема [20] – неможливо із вірогід-

ністю 1 прогнозувати умови роботи компанії контейнерного перевізника та поведінку компаній-конкурентів;

2) *Відсутність вичерпної інформації* щодо усіх складових контейнеропотоків. Неповнота інформації завжди супроводжує процеси прийняття рішень, що пов'язано з неповнотою та / або недостовірною інформацією про умови роботи майже усіх ринкових суб'єктів.

Таким чином, природа ринкових відношень обумовлює наявність априорі невизначеності майже усіх параметрів, які розглядаються під час прийняття рішень. Крім того, достатньо динамічні зміни та вплив багатьох факторів на ринку морських перевезень є також властивістю, яка належить усім секторам фрахтового ринку.

Невизначеність контейнеропотоків може розглядатися у двох варіантах:

1) «статистична невизначеність» – в умовах, коли є статистика про «поведінку» контейнеропотоків за минулі періоди, що дає можливість

встановити параметри закону розподілу – середнє значення (математичне очікування) та дисперсію, а далі спрогнозувати динаміку середнього значення – цей підхід зокрема використовувався у [22] для суден-балкерів;

2) «нестатистична невизначеність» – за умов, коли можна оцінити можливі значення й відповідні ймовірності (суб'єктивні ймовірності) – наприклад, при хаотичному поведінці ринку чи створенні лінії у регіоні, де раніше не було контейнерних сервісів.

І той, і інший варіант відповідають невизначеності, яка класифікується як «часткова невизначеність» чи «умови ризику» [20, 21].

При повній невизначеності, коли ймовірності різних значень контейнеропотоків близькі до 0, тобто немає найбільш значимих можливих варіантів майбутньої ситуації, як правило, рішення з управління роботою суден не приймаються, а особи, які приймають рішення, спираються на різні сценарії, які можуть бути ідентифіковані як «нестатистична невизначеність».

Висновки. Невизначеність, яка властива контейнеропотокам, зумовлює відхилення результатів роботи суден [11] та функціонування лінійного сервісу загалом від запланованих, як і визначає сутність комерційного ризику для перевізника. Природно, що на відхилення результатів впливають не лише контейнеропотоки, зміни вартості суд-

нового палива, подорожчання суднозаходів у порти та проходження каналів (проток) та інші фактори також формують комерційні ризики перевізника. Але, як показують результати досліджень з даної тематики (наприклад, [10, 12, 15]), саме зміна вантажної бази та вартості перевезення (тарифів) є факторами, що найбільш сильно впливають на відхилення планованих (прогнозованих) результатів роботи суден. Встановлення сутності невизначеності контейнеропотоків є базою для подальшого дослідження впливу даної невизначеності на ефективність роботи суден та функціонування контейнерної лінії. Тому в даному дослідженні у трьох етапному розгляді встановлено: сутність та структура контейнеропотоків у системі морських перевезень при розгляді їх з різним ступенем деталізації та з урахуванням різних аспектів формування структури; математичний опис структури контейнеропотоків, який враховує різні аспекти формування структури – порти, регіони, товарна група; а також основні етапи та фактори впливу та формування невизначеності контейнеропотоків компанії-перевізника – від мінливості світової торгівлі до конкурентного середовища компанії-перевізників у регіоні. Отримані результати складають основу для подальших досліджень питання оцінки ефективності роботи суден-контейнеровозів при врахуванні впливу невизначеності контейнеропотоків.

Список літератури:

1. Review of Maritime Transport 2023. URL: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023> (дата звернення: 10.01.2024)
2. 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, P. 223–235. DOI: 10.20858/sjsutst.2022.116.14
3. Melnyk O., Onyshchenko S., Onishchenko O., Shumylo O., Voloshyn A., Ocheretna V. & Fedorenko O. Implementation Research of Alternative Fuels and Technologies in Maritime Transport. *Modern Technologies in Energy and Transport. Studies in Systems, Decision and Control*. 2024. vol 510, P.13-21. DOI: 10.1007/978-3-031-44351-0_2
4. Onyshchenko S., Vyshnevskaya O., & Vyshnevskiy D. Justification of the optimal option and transportation parameters for export supplies using marine transport. *Technology Audit and Production Reserves*. 2023. Vol. 2(2(70)), P. 34–39. DOI: 10.15587/2706-5448.2023.277804
5. Решетков Д.М., Онищенко С. П., Павлова Н. Л., Кириллова В. Ю. Сутність, переваги та проблемами автоматизації контейнерних терміналів морських портів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Том 34 (73) № 2, С. 194–202. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.2.2/33
6. Drozhzhyn O., Koskina Y. The Model of Container Feeder Line Organization Focused on the Nature and Parameters of External Container Flows. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2021. Vol. 23(2), P. 94-102. DOI: 10.26552/com.C.2021.2.A94-A102
7. Drozhzhyn O. Containership Traffic Optimization on Feeder Shipping Line. *Transport and Telecommunication Journal*. 2016. Vol.17(4), P. 314-321. DOI: 10.1515/tj-2016-0028
8. Ksciuk J., Kuhlemann S., Tierney K., Koberstein A. Uncertainty in maritime ship routing and scheduling: A Literature review. *European Journal of Operational Research*. 2023. Vol. 308, Issue 2, P. 499-524, DOI: 10.1016/j.ejor.2022.08.006

9. Meng Q., Wang S., Andersson H., Thun K. Containership Routing and Scheduling in Liner Shipping: Overview and Future Research Directions. *Transportation Science*. 2014. Vol.48, P. 265-280. DOI: 10.1287/trsc.2013.0461
10. Берестенко В., Онищенко С. Ймовірнісні характеристики мультимодальної доставки. *Розвиток транспорту*. 2021. Vol. 1(12), P. 118-128 DOI: 10.33082/td.2022.1-12.10
11. Vyshnevskiy D., Vyshnevskaya O., Onyshchenko S. Modeling of the distribution of the vessels' time budget under long-term freight contracts within conditions of uncertainty. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті*. 2019. Vol. 69 (4), P. 15–25. DOI: 10.31375/2226-1915-2019-4-15-25
12. Koskina Y., Onyshchenko S., Drozhzhyn O., Melnyk O. Efficiency of tramp fleet operating under the contracts of affreightment. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2023. Vol. 20, P. 137-149 DOI: 10.20858/sjsutst.2023.120.9.
13. Onyshchenko S., Melnyk O. Efficiency of ship operation in transportation of oversized and heavy cargo by optimizing the speed mode considering the impact of weather conditions. *Transport and Telecommunication Journal*. 2022. Vol. 23(1), P. 73–80. DOI: 10.2478/ttj-2022-0007
14. Li M., Xu H. Economies of scale in container ship under uncertainty of traffic volume. Dalian Haishi Daxue Xuebao. *Journal of Dalian Maritime University*. 2013. Vol. 39, P. 103-106.
15. Vyshnevskaya O., Vishnevskiy D. Investigation of the effect of ship size and marine transportation distance on the possible decrease of voyage efficiency. *Technology Audit and Production Reserves*. 2017. Vol. 1(2(33)), P. 38–44. DOI: 10.15587/2312-8372.2017.92965
16. Hani Alyami, Zaili Yang, Ramin Riahi, Stephen Bonsall, Jin Wang. Advanced uncertainty modelling for container port risk analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 2019. Vol.123, P. 411–421. DOI: 10.1016/j.aap.2016.08.007
17. Russell D., Ruamsook K., Roso V. Managing supply chain uncertainty by building flexibility in container port capacity: a logistics triad perspective and the COVID-19 case. *Maritime Economics and Logistics*. 2022. Vol. 24, P. 92–113 DOI: 10.1057/s41278-020-00168-1
18. Chien-Chang Chou, Rong-Hua Gou, Chaur-Luh Tsai, Ming-Cheng Tsou, Chun-Pong Wong, Hui-Lin Yu. Application of a mixed fuzzy decision making and optimization programming model to the empty container allocation. *Applied Soft Computing*. 2010. Vol. 10, Issue 4, P. 1071-1079 DOI: 10.1016/j.asoc.2010.05.008
19. Elmi Z, Singh P, Meriga VK, Goniewicz K, Borowska-Stefańska M, Wiśniewski S, Dulebenets MA. Uncertainties in Liner Shipping and Ship Schedule Recovery: A State-of-the-Art Review. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol.10(5) P. 563. <https://doi.org/10.3390/jmse10050563>
20. Економіка невизначеності: практичний погляд на проблему: Монографія / за ред. В. І. Грушка. Київ: Університет економіки та права «КРОК». 2021. 503 с.
21. Ризики у транспортних процесах: навч. посібник / І. О. Ткаченко; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. 2017. 114 с.
22. Onyshchenko S. P., Koskina Y. O. Ensuring the given level of the voyage efficiency considering the risks factors associated with the charter party terms. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2018. № 37, С. 192-201. DOI: 10.31498/2225-6733.37.2018.160296

Bondarenko Yu.A., Onyshchenko S.P. THE STRUCTURE AND UNCERTAINTY OF CONTAINER FLOWS IN THE MARITIME TRANSPORTATION SYSTEM

A variety of factors affect the container ships operation results: changes of the ship fuel price, the increase of the port's dues and charges as well as the prices to passage through canals, etc., which determines the carrier's commercial risks. But the main factor that affects the efficiency of the container line is the demand for transportation, which has a probabilistic nature. This, in turn, causes the uncertainty of container flows, which form the cargo base for container ships between certain ports. In this study the essence and structure of container flows in the maritime transport system were determined taking into account the different points of view, different levels with different details and various aspects of the container flows structure. A scheme of compliance with the degree of container flows consideration and main issues of container ships operating has been formed. Also, the main reasons for the redistribution of container flows between ports in the maritime transportation system are considered. A description of the structure of container flows in the mathematics terms was carried out, which takes into account various aspects of the container flows structure – ports, regions, commodity groups. The main stages and factors influencing and shaping the uncertainty of the carrier's container flows are established and characterized – from the variability of maritime world trade to the competitive environment of the carrier in the region. The container flows uncertainty may be considered in two variants: 1) “statistical uncertainty” – when there are statistics on the “behavior” of container flows for past periods, which makes it possible to determine the distribution parameters and predict their dynamics; 2) “non-statistical uncertainty” – when possible values and corresponding subjective probabilities can be estimated – for example, in the case of chaotic market behavior or for establishing a container line in a region where container services are not available. The obtained results form a theoretical basis for further research on the issue of evaluating the container ships operating efficiency, taking into account the impact of the container flows uncertainty.

Key words: container transportation, ship efficiency, uncertainty, commercial risk, deviation of transportation parameters.

УДК 656.7 : 330.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/24>**Висоцька І.І.**

Національний авіаційний університет

Соловійова О.О.

Національний авіаційний університет

Соколова О.Є.

Національний авіаційний університет

Борець І.В.

Національний авіаційний університет

Валько А.М.

Національний авіаційний університет

СТРАТЕГІЧНИЙ РОЗВИТОК АЕРОПОРТУ «БОРИСПІЛЬ» В ПОВОЄННИЙ ПЕРІОД

У статті розглянуто діяльність міжнародного аеропорту «Бориспіль» в умовах невизначеності зовнішнього середовища, що спричинене негативним впливом пандемії нової коронавірусної хвороби (COVID-19) та військовими діями, що почалися на початку 2022 року. З'ясовано, що 24 лютого 2022 року було закрито повітряний простір України для цивільних користувачів повітряного простору. Це призвело до призупинення операційної діяльності аеропорту. Визначено напрями стратегічного розвитку аеропорту «Бориспіль» у повоєнний період згідно Проєкту плану відновлення України, розробленого робочою групою з відновлення та розбудови інфраструктури у липні 2022 року. Одним із ключових напрямів економічного розвитку у довгостроковій перспективі є розвиток та підтримання інфраструктури аеропорту, а саме впровадження «хабової» стратегії розвитку аеропорту. Стратегія розвитку аеропорту як «хаб» спрямована на залучення більшої кількості транзитних пасажирів із закордонних ринків. Досліджено історичний розвиток аеропорту, який показав, що в довгостроковій перспективі пасажиропотік зростає. Протягом двох десятиліть середнє щорічне зростання пасажиропотоку аеропорту становить 13,0%. Визначено критерії, що впливають на розробку економічної стратегії розвитку та швидкість відновлення операційної діяльності Аеропорту. Наведено рекомендації щодо авіаційної безпеки в міжнародних аеропортах. Також одним з основних напрямів формування економічної стратегії є розвиток вантажної інфраструктури. З метою збільшення вантажопотоку через аеропорт «Бориспіль» та покращення якості обслуговування вантажно-поштових перевезень запропоновано створення мульти-модального вантажно-логістичного центру (МВЛЦ) в Міжнародному аеропорту «Бориспіль», який планується запроваджувати компанією *Yuunair* на умовах державно-приватного партнерства. Зроблено розрахунки ефективності інвестиційного проєкту формування МВЛЦ в аеропорту «Бориспіль».

Ключові слова: аеропорт, авіаційні перевезення, авіаційна безпека, розвиток інфраструктури, авіаційний транспортний вузол, інвестиційний проєкт.

Постановка проблеми. Міжнародні аеропорти, як стратегічний об'єкт економічної системи країни, потребують особливої уваги з точки зору визначення стратегічних напрямів розвитку в період лібералізації космічного простору та зростання терористичної загрози в Україні.

Міжнародний аеропорт «Бориспіль» є найпотужнішим в Україні та приймає 68% авіаперевезень України. Тому особливо важливим є пошук фінансових ресурсів, які дозволять інвестувати в розвиток інфраструктури аеропорту та розробити стратегічні напрями економічного розвитку, що включають всі елементи авіаційної діяльності.

На визначення економічної стратегії розвитку впливають різноманітні фактори, до яких слід віднести негативний вплив пандемії нової коронавірусної хвороби (COVID-19), яка змусила підприємства в усьому світі виживати в умовах кризи та орієнтуватися в шляхах розвитку, враховуючи карантин і обмеження, пов'язані з коронавірусом, і змушені знаходити способи виконання діяльності.

В Україні до негативних факторів впливу на економіку слід віднести ще і військові дії, що почалися на початку 2022 року. У відповідь на вторгнення Російської Федерації органи Служби повітряного транспорту України та Державіа-

адміністрації 24 лютого 2022 року закрили повітряний простір України для цивільних користувачів повітряного простору.

В умовах призупинення операційної діяльності аеропорту, було вирішено зберегти людські та матеріальні ресурси, щоби забезпечити швидке відновлення діяльності в повоєнний період. Для цього Підприємству потрібно розробити «Заходи з виконання Програми відновлення роботи та виходу із кризи ДП МА «Бориспіль»». Ці заходи мають бути спрямовані на розвиток аеропорту до рівня «логістичного хаба», враховуючи вигідне геополітичне положення аеропорту, що є одним із напрямів формування економічної стратегії аеропорту «Бориспіль».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемами та особливостями стратегічного розвитку організацій висвітлювалося у багатьох роботах вітчизняних і зарубіжних вчених, таких як: Виханський О.С., Горемікін В.А., Гаркавенко С.В., Журова Л.І., Кавенькін А.А., Скобкін С.С., Лапигін Ю.Н., Махаліна О.М., Смірнов Д.Б., Градов А.П., Томпсон А.А., Стрікленд А. Дж., Александр Л.Д., Хігінс Дж.М., Ірвін Р.А., Ярзабковскі П., Пірс Дж.А., Робінсон Р.Б., Портер М., Шендель Д., Хатген К., Сміт Дж., Арнольд Д., Віпп Р. Тощо. У своїх роботах автори досліджували сутність та зміст стратегічного розвитку підприємств, особливості формування стратегічного розвитку, що обумовлювалися впливом різних факторів, які виникають під час функціонування підприємства, а також пропонували різні погляди на обґрунтування економічної стратегії розвитку та її практичної реалізації.

Але питання вибору та формування економічної стратегії розвитку підприємства у пропоно-

ваних обставинах вимагають більш детального і глибинного дослідження.

Метою статті є розробка проектних пропозицій щодо формування економічної стратегії аеропорту «Бориспіль», одним з напрямків якої є створення мультимодального вантажно-логістичного центру.

Виклад основного матеріалу. Сучасні аеропорти – це не тільки авіаційні комплекси, а й зони контролю різних суб'єктів авіаційного ринку, які постійно взаємодіють.

Сфера діяльності аеропорту включає все, що стосується обслуговування повітряних суден, пасажирів і вантажів, включаючи незначні питання, пов'язані з роботою терміналів та інших елементів інфраструктури аеропорту.

Економічний розвиток аеропорту здійснюється з використанням логістичних підходів і процесів. В першу чергу визначаються пріоритетні види діяльності що будуть визначені у довго- і середньостроковій стратегії діяльності аеропорту.

Одним із ключових напрямків економічного розвитку у довгостроковій перспективі аеропортів є розвиток та підтримання інфраструктури аеропорту, а саме впровадження «хабової» стратегії розвитку аеропорту.

Історичний розвитку аеропорту показує, що в довгостроковій перспективі пасажиропотік зростає (рис. 1). Протягом двох десятиліть, середнє щорічне зростання пасажиропотоку аеропорту становить 13,0%.

У 2020 році обсяги перевезень аеропорту зменшились на 66%, більше, ніж у середньому в Європі. Цьому посприяли введення картинних обмежень пасажирських авіаперевезень з березня 2020 року, що призвело до суттєвого падіння

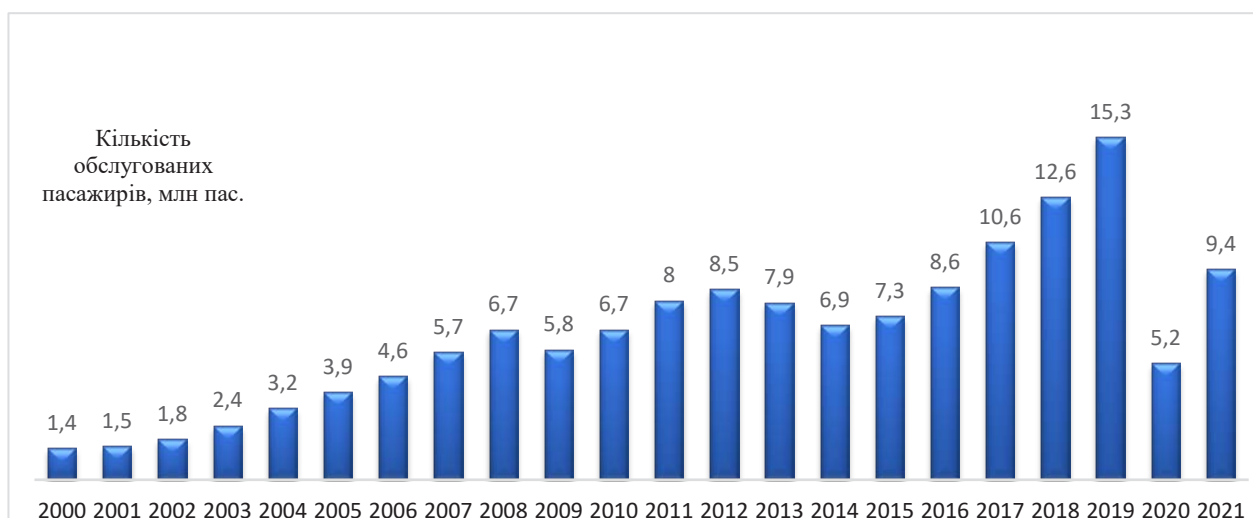


Рис. 1. Історія розвитку Аеропорту «Бориспіль» до 2021 року [1]

пасажиропотоку у 2020 році, а внаслідок оголошення воєнного стану, з 24 лютого 2022 року повністю призупинилося обслуговування пасажирів. Замість очікуваного щорічного зростання в 2020 році відбувся значний спад пасажиропотоку – 66% до 2019 року.

Відповідно до поточного прогнозу 2021 року, аеропорт «Бориспіль» у 2022 році мав всі можливості обслужити 13 млн пасажирів [1].

Зазначимо, що військові події відбуваються під час значної економічної невизначеності та нестабільності у світі, тому наслідки, скоріше за все, будуть взаємодіяти з наслідками поточних ринкових умов і посилювати їх.

Після військового вторгнення Російської Федерації Державіаслужба та органи ОЦВС згідно до вимог Повітряного кодексу України та Положення про використання повітряного простору України 24 лютого 2022 року було вжито заходи щодо закриття повітряного простору України для цивільних користувачів повітряних ліній.

Щоб успішно конкурувати з хабовими аеропортами, «Бориспіль» має не лише забезпечити необхідну інфраструктуру для обслуговування зростаючих трансферних і прямих пасажиропотоків, а й співпрацювати з базовими авіакомпаніями у розвитку маршрутів і трансферних потоків. Важливою складовою є забезпечення авіаційної безпеки, яка забезпечується системою авіаційної безпеки (САБ) та підрозділами воєнізованої охорони аеропортів та авіакомпаній, а також спеціально уповноваженими органами, наділеними цими правами федеральними законами. Для попередження актів незаконного втручання в міжнародних аеропортах IATA розробила вісім рекомендацій [2]:

1. Найефективнішими заходами захисту аеропорту від АНВ є розробка Програми безпеки аеропорту, створення комітету з авіаційної безпеки, упровадження програм підготовки, перепідготовки і підвищення кваліфікації персоналу. Розробка плану дій персоналу у разі непередбачених обставин дозволяє сформувати необхідні сили і засоби, оптимально розподілити ресурси для захисту міжнародного аеропорту від АНВ.

2. Реальну допомогу у разі виникнення АНВ може надати спеціальна, добре тренована та оснащена команда, яка здійснює патрулювання в аеропорту.

3. Організація контрольованої зони в аеропорту, здійснення на її вході огляду пасажирів та ручної поклажі дозволяють запобігти доставці на борт ПС зброї і інших небезпечних предметів.

4. Постійно діючі приховані засоби зв'язку зон контролю пасажирів з іншими зонами, а також

з центром контролю сприяють швидкій реакції на передбачувану або реальну загрозу вчинення АНВ.

5. Огорожа території аеропорту дозволяє обмежити доступ небажаних персон та транспорту в контрольовану та зони обмеженого доступу, що охороняються.

6. Для відділення пасажирів від зони розміщення вантажу, багажу, пошти, складських приміщень, приміщень зберігання бортприпасів необхідно використовувати додаткові огорожі.

7. Місця стоянок повітряних суден повинні контролюватися, охоронятися та добре освітлюватися.

8. При проектуванні і реконструкції міжнародних аеропортів необхідно виконувати спеціальні архітектурні вимоги для забезпечення заходів безпеки.

Розробка економічної стратегії розвитку та швидкість відновлення операційної діяльності Аеропорту будуть залежати від багатьох критеріїв та передумов, що впливають на можливість провадження господарської діяльності та формують попит з боку клієнтів [3]:

– закінчення бойових дій, підписання мирного договору, скасування воєнного стану;

– відкриття повітряного простору для всіх видів рейсів цивільної авіації, зважаючи на те, що стан інфраструктури аеропорту та цивільної авіації України залишиться хоча б на рівні початку 2022 року;

– стабілізація макрофінансових показників та відновлення економіки країни;

– повернення населення, яке наразі перебуває за кордоном;

– забезпечення логістичних поставок палива та інших важливих матеріалів, тощо;

– спроможність базових авіакомпаній відновити свої польоти з урахуванням того, що не буде відбуватися підвищення аеропортових зборів;

– Україна вважається безпечною для туристичних подорожей.

Для відновлення України у післявоєнний період необхідно проводити ефективну роботу по залученню коштів іноземних інвесторів, фондів, міжнародних фінансових установ. ДП МА «Бориспіль» – є найкращим майданчиком для організації презентацій проєктів, які потребують інвестування в Україну.

Таким чином, при формуванні економічної стратегії аеропорту «Бориспіль» слід звернути увагу на Проєкт плану відновлення України, розробленого робочою групою з відновлення та розбудови інфраструктури у липні 2022 року, в якому представлено пропозиції щодо розбудови інфраструктури за сферами, кожна з яких має свій

перелік завдань, відповідно до яких підготовлені напрацювання.

Для авіаційної галузі напрацьовано Проектом Плану відновлення України виконання наступних завдань [4]:

1. Для подальшого розвитку та відбудови інфраструктури аеропортів України необхідно:

- здійснювати модернізацію аеропортів регіонів та привести їх технічний стан у відповідності діючих стандартів та рекомендацій ІКАО, що дасть можливість обслуговувати різні типи повітряних суден;

- залучення фінансових інвестицій для відновлення мережі аеропортів України, основою визначення розміру яких має стати аудит отриманих збитків транспортної інфраструктури;

- продовжити розвиток вузлової хабової моделі аеропорту ДП «МА «Бориспіль»;

- продовжити розвиток ДП «МА «Львів»;

- створити спеціальний фонд Державного бюджету, призначеного для розвитку аеропортів;

- створити керуючу компанію (може бути державний орган) з управління аеродромними комплексами, що збудовані за державні кошти і які перебувають у державній власності.

2. Здійснювати лібералізаційне регулювання ринків авіаперевезень, а саме:

- зняти обмеження щодо здійснення міжнародних регулярних повітряних сполучень;

- розширення мережі міжнародних повітряних сполучень з країнами-партнерами;

- збільшити частку лоукостерів;

- створити національну авіакомпанію;

- розвивати вантажні авіаперевезення.

З огляду на викладені завдання бачимо, що одним з пріоритетів є подальший розвиток та відбудова інфраструктури аеропортів, де вказується на продовження розвитку вузлової хабової моделі аеропорту ДП «МА «Бориспіль».

Також авіакомпанії, зокрема, лоукостери вже заявили про наміри повернутись в Україну після війни. Перевізники працюють з аеропортом для визначення нових маршрутів, які поєднують Київ із центрами Європи, що розмістили велику кількість українців, які тікали від війни. Передбачається і певний попит на туристичні поїздки.

Лоукостер Ryanair планує швидко відновити авіаперевезення після закінчення війни. Компанія відкриє 75 маршрутів із Європи до України протягом восьми тижнів, як український повітряний простір визнають безпечним [5].

Ryanair планує інвестувати близько 3 мільярдів доларів у відновлення українського ринку авіапе-

ревозень, а також розмістити до 30 нових літаків Boeing Max в аеропортах Києва, Львова й Одеси.

Також одним з основних напрямів формування економічної стратегії розвитку є розвиток вантажної інфраструктури. Вантажний сегмент залишається стабільним і показує позитивну динаміку зростання. Станом на 31.12.2021 року карго-термінал ДП МА «Бориспіль» працював на межі пікової спроможності.

Тому у даній роботі запропоновано створення мультимодального вантажно-логістичного центру в Міжнародному аеропорту «Бориспіль», який може стати потужним авіаційним транспортно-логістичним вузлом не лише в Україні, але й у Європі. Проект запроваджується компанією Ryanair на умовах державно-приватного партнерства (ДПП). Компанія Ryanair розглядає аеропорт «Бориспіль» як свій потенційний хаб для регіону Кавказу і Центральної Азії. Але для цього необхідно відновити нормальне пасажирське авіасполучення, а також необхідно, щоб в аеропорту з'явився новий вантажний термінал [5].

Запропонований проект допоможе вирішити всі вищезазначені проблеми щодо обробки вантажів, що перевозяться повітряним транспортом, а також внесе вагомий внесок у реалізацію Національної транспортної стратегії до 2045 року та проекту Плану відновлення України авіаційної галузі, і це дозволить [6, 4]:

- за рахунок приватних інвестицій в інфраструктуру терміналів аеропорту в рамках державно-приватного партнерства розвинути вантажотransпортну інфраструктуру Міжнародного аеропорту «Бориспіль» відповідно до сучасних технічних вимог та суттєво збільшити обсяги вантажопотоків через Міжнародний аеропорт «Бориспіль»;

- розвивати мережу логістичних систем інноваційного типу обробки повітряних вантажів шляхом впровадження «дружнього» інтерфейсу взаємодії між замовником та їх безпосереднім виконавцем;

- створювати нові робочі місця в транспортній галузі;

- шляхом модернізації привести інфраструктуру аеропорту у відповідності зі стандартами та рекомендованою практикою АТЛЦ із збереженням державного майнового комплексу аеропорту «Бориспіль».

Метою проекту є суттєве збільшення вантажопотоку через аеропорт «Бориспіль» та покращення роботи вантажно-поштових перевезень через аеропорт «Бориспіль» шляхом забезпечення

якості послуг з обробки вантажів відповідно до найвищих світових стандартів у цій галузі.

Досягнення мети проєкту пропонується вирішенням наступних завдань:

- модернізація та технологічна трансформація складської інфраструктури існуючого вантажного терміналу аеропорту «Бориспіль», а також трансформація існуючих бізнес-процесів з обробки вантажів дозволить збільшити обсяги перевалки вантажів на 50%. Удосконалити та підвищити якість першого року роботи існуючих вантажних терміналів та надання відповідних послуг;

- здійснення будівництва сучасного вантажного терміналу в аеропорту «Бориспіль», який дозволить стати аеропорту потужним хабом для перевалки вантажів за маршрутами: Азія, Європа, Америка.

Пропонуємо включити до структури об'єкта державно-приватного партнерства (ДПП): існуючий вантажний термінал державної форми власності, який знаходиться на балансі державного підприємства Міжнародний аеропорт «Бориспіль», а також новий вантажний термінал, який буде створений приватним партнером Ryanair за угодою про державно-приватне партнерство в аеропорту.

Реалізація цього проєкту передбачає передачу земельної ділянки для будівництва нового вантажного терміналу в міжнародному аеропорту «Бориспіль» приватному партнеру на термін, визначений договором, укладеним в рамках ДПП. Відповідно до Закону України «Про державно-приватне партнерство» у тендерній документації мають бути визначені порядок та умови отримання права користування цією земельною ділянкою, а також джерела фінансування, слід зазначити, що складання (підготовка) землевпорядної документації та її розгляд (у разі необхідності) здійснюється на етапі підготовки конкурсу на реалізацію ДПП за умови погодження Міністерства економіки [7].

Беручи до уваги світовий досвід та подібні проєкти, припускаємо, що за результатами проєкту очікується досягнення наступних показників ефективності:

- після року початку проєкту відбулося збільшення обробки вантажів на існуючому вантажному терміналі на 50% порівняно з поточним обсягом (в 2019 році аеропорт переробив 42,02 тис. т вантажу);

- через 2,5 роки після початку проєкту, приблизно з січня 2024 року, повністю введено в експлуатацію новий вантажний комплекс в Міжнародному аеропорту «Бориспіль»;

- протягом 3 років після введення в експлуатацію сучасного вантажного терміналу забезпечувати збільшення вантажних перевезень на 10% щороку; у наступні 5 років на 7% щорічно; у наступні 5 років на 3% щорічно; потім на 1% щорічно.

Територія проєкту МВЛЦ становитиме 100 га і буде розділена на різні зони, де будуть розташовані адмінбудівлі, а в майбутньому торгово-виставковий центр. Максимальна потужність вантажного терміналу складатиме 150 тис. тонн на рік.

При плануванні прогнозованого вантажопотоку беремо 2019 рік за основу, оскільки ці показники відображають реально можливі вантажопотоки через аеропорт «Бориспіль».

Отже, створений МВЛЦ в аеропорту «Бориспіль» буде впливати на роботу не лише компанії Ryanair, а й на роботу самого аеропорту, за рахунок збільшення обсягів експортних, імпортних та транзитних вантажів, що проходять через його територію.

Далі необхідно зробити розрахунки критеріїв ефективності проєкту створення компанією Ryanair МВЛЦ на базі аеропорту «Бориспіль» [8].

Загальні витрати складаються з суми постійних та змінних витрат:

$$C_a = C_{fix} + C_{var}, \quad (1)$$

де: C_{fix} – постійні витрати; C_{var} – змінні витрати.

Постійні витрати є функцією часу, а не обсягу виконаної продукції або послуг, що надаються. До постійних витрат належать витрати на утримання управлінського персоналу, страхування, охорону підприємства. Ці витрати залишаються незмінними незалежно від того, скільки продукції виробляє компанія. Постійні витрати можуть бути представлені наступною функцією:

$$C_{fix} = F(t), \quad (2)$$

де C_{fix} – постійні витрати; t – час.

Постійні витрати визначаються як 3% від загальної вартості проєкту:

$$C_{fix} = 777\,000\,000 * 3\% = 23\,310\,000 \text{ грн}$$

Змінні витрати – витрати, які залежать від обсягу продукції (матеріали, заробітна плата, сировина) відображаються як функція від обсягу вантажу:

$$C_{var} = F(Q), \quad (3)$$

де Q – об'єм наданих послуг.

Змінні витрати розраховуються наступним чином:

$$C_{var} = C_{z/n} + C_{mp} + C_{in}, \quad (3.4)$$

де $C_{z/n}$ – витрати на заробітну плату, що залежить від кількості працівників;

$C_{тр}$ – витрати на транспортування та зберігання вантажу;

$C_{ін}$ – інші витрати (витрати на утримання та навчання працівників, експлуатаційні витрати та ін., які складають 50% від витрат на зарплату працівників).

Для проведення проектних пропозицій зроблено наступні припущення:

– на одну людину норма електроспоживання – 75 КВ, тоді визначимо, що вантажно-логістичний центр споживає в середньому 71250 КВ/рік. Це споживання щорічно буде зростати за рахунок збільшення вантажних перевезень. Кількість працівників МВЛЦ – 950 осіб;

– зберігання на складі 1 тонни вантажу – 1295 грн, причому за 2 доби зберігання надаються безкоштовно;

– середня вартість перевезення 1 тони вантажу – 444 грн;

– середня зарплата – 14800 грн (враховуючи інфляційні процеси, припустимо, що з кожним роком розмір з/п кожного працівника буде збільшуватися на 5%).

Змінні витрати на початку діяльності будуть збільшені, враховуючи кошти на обладнання приміщень, будівництво та навчання персоналу, а потім забезпечується експлуатаційне обслуговування. Прогнозовані обсяги та витрати на логістичний центр наведено у таблиці 1.

Прямі доходи аеропорту можуть розраховуватися за тарифами на послуги з обробки вантажів та обслуговування польотів. Будемо вважати, що проєкт аеропорту встановить власний перелік послуг з тарифами для споживачів вантажної клієнтури.

У таблиці 2 наведені запропоновані тарифи та перелік послуг з обслуговування вантажів [9].

При розрахунку прямих доходів в залежності від річних обсягів вантажопотоку будемо враховувати інфляцію 10% на рік. Припустимо, що непрямі витрати становлять 40% від прямих аеропортових послуг.

Основним важливим критерієм успішної роботи авіаційного вантажно-логістичного центру є його прибутковість. Прибуток визначається наступним чином:

$$D'_a = D_a - C_a \quad (5)$$

Для визначення ефективності проєкту МВЛЦ в аеропорту «Бориспіль» розрахуємо наступні критерії: чиста теперішня вартість (NPV), співвідношення витрат і вигод (BCR), внутрішня норма прибутку (IRR).

Отже, чиста теперішня вартість (NPV) визначається наступним чином:

$$ЧПД = ГП - ІК, \quad (6)$$

де ГП – грошовий потік; ІК – інвестований капітал.

Індекс прибутковості визначається:

Таблиця 1

Прогнозовані обсяги та витрати логістичного центру аеропорту «Бориспіль»

Рік	Обсяг наданих послуг, (тонн)	Витрати на транспортування та зберігання вантажу, млн грн	Кількість працівників, осіб	Витрати на оплату праці, млн грн	Інші витрати, млн грн	Змінні витрати, млн грн	Постійні витрати, млн грн	Всього витрати, млн грн
2024	63 034,50	36,15	950	14,06	7,03	57,24	23,31	137,79
2025	69 337,95	39,76	950	14,76	7,38	61,91	23,31	147,13
2026	76 271,75	43,74	950	15,50	7,75	66,99	23,31	157,3
2027	83 898,92	48,12	950	16,28	8,14	72,53	23,31	168,37
2028	89 771,84	51,48	950	17,09	8,54	77,12	23,31	177,55
2029	96 055,87	55,09	950	17,94	8,97	82,00	23,31	187,32
2030	102 779,78	58,94	950	18,84	9,42	87,21	23,31	197,72
2031	109 974,37	63,07	950	19,78	9,89	92,78	23,31	208,8
2032	117 672,57	67,48	950	20,77	10,39	98,64	23,31	220,60
2033	121 202,75	69,51	950	21,81	10,91	102,23	23,31	227,76
2034	124 838,83	71,60	950	22,90	11,45	105,95	23,31	235,21
2035	128 584,00	73,74	950	24,05	12,02	109,81	23,31	242,94
2036	132 441,52	75,95	950	25,25	12,62	113,83	23,31	250,97
2037	133 765,93	76,71	950	26,51	13,26	116,48	23,31	256,28
Всього:	–	831,36	–	275,56	137,78	1244,70	326,34	2815,77

Таблиця 2

Пропоновані тарифи на послуги в МВЛЦ аеропорту «Бориспіль»

Вид робіт	Вартість робіт, грн
комплексне обслуговування вантажів в терміналах, грн/т	2405
забезпечення авіаційної безпеки вантажів, грн/т	185
наднормативне зберігання вантажу, грн/т	111
завантаження/розвантаження, грн/т	703
переоформлення вантажу, грн/т	111

$$ПП = \frac{ГП^d}{ИК} \quad (7)$$

Період окупності визначається:

$$ПО = \frac{ИК}{ГП^d / n}, \quad (8)$$

де: n – кількість років реалізації проекту.

Внутрішня норма дохідності визначається:

$$ВНД = i_1 + \frac{ЧПД_1}{ЧПД_1 - ЧПД_2} (i_2 - i_1), \quad (9)$$

де i_1 – ставка дисконту, що забезпечує позитивне значення ЧПД;

i_2 – ставка дисконту, що забезпечує негативне значення ЧПД.

Результати розрахунків ефективності проекту формування МВЛЦ в аеропорту «Бориспіль»

при ставці дисконтування $i = 10\%$ представлено в таблиці 3.

Отримані дані дозволяють сформулювати наступну логічну тенденцію розвитку проектного мультимодального вантажно-логістичного центру в аеропорту «Бориспіль» (рис. 2):

- на початку функціонування мультимодального вантажно-логістичного центру в аеропорту «Бориспіль» у 2024 році, прибуток та рентабельність мають від’ємні значення;

- період беззбитковості спостерігаємо у 2028 році (на графіку бачимо перетин ліній прибутку та витрат);

- позитивну динаміку економічного результату функціонування вантажно-логістичного центру в аеропорту «Бориспіль» спостерігаємо, починаючи з 2029 року (прибутки перевищують витрати).

За отриманими результатами можна стверджувати, що проектні пропозиції щодо створення МВЛЦ дозволять компанії Ryanair та аеропорту «Бориспіль» отримати чистий приведений дохід за ставкою дисконтування 10% в розмірі 4 251,47 млн грн. Індекс прибутковості проекту складає 6,47, а інвестиційні вкладення окупляться через 2,16 років.

Таким чином, реалізація представленого напряму формування економічної стратегії ДП МА «Бориспіль» дасть можливість побудувати потужний інтермодальний транспортно-

Таблиця 3

Ефективність проекту формування МВЛЦ в аеропорту «Бориспіль» ($i=10\%$)

Рік	Вигоди, млн грн	Витрати, млн грн	Чисті вигоди, млн грн	Коефіцієнт приведення, K_i (10%)	Дисконтовані чисті вигоди, млн грн
2024 р.	277,54	80,55	196,99	0,90909091	179,08
2025 р.	335,82	85,22	250,60	0,82644628	207,11
2026 р.	406,35	90,30	316,04	0,7513148	237,45
2027 р.	491,68	95,84	395,84	0,68301346	270,36
2028 р.	578,71	100,43	478,28	0,62092132	296,97
2029 р.	681,14	105,31	575,82	0,56447393	325,04
2030 р.	801,70	110,52	691,18	0,51315812	354,69
2031 р.	943,60	116,06	827,55	0,46650738	386,06
2032 р.	1 110,62	121,95	988,67	0,42409762	419,29
2033 р.	1 258,33	125,54	1 132,79	0,38554329	436,74
2034р.	1 425,69	129,26	1 296,43	0,3504939	454,39
2035р.	1 615,31	133,12	1 482,18	0,31863082	472,27
2036р.	1 830,14	137,14	1 693,00	0,28966438	490,40
2037р.	2 033,29	139,79	1 893,50	0,26333125	498,62
Разом:	13 789,93	1 571,04	12 218,89	–	5 028,47
Інвестований капітал (ИК)					777,00
ЧПД = ГП – ИК					4251,47
Індекс прибутковості (П)					6,47
Період окупності (ПО)					2,16

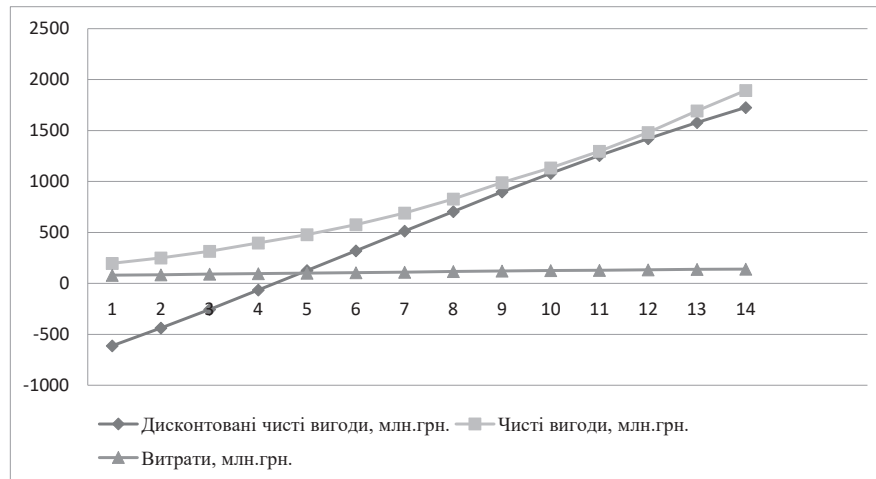


Рис. 2. Очікувані фінансові результати за проектом створення МВЛЦ в аеропорту «Бориспіль»

логістичний хаб у Київській області та по всій Україні, збільшивши транспортний потенціал країни, генеруючи додаткові надходження до бюджету та сприяючи розвитку конкурентоспроможності країни у світі.

Висновки. У даному дослідженні розглянуто діяльність ДП МА «Бориспіль» в умовах призупинення Аеропортом операційної діяльності. Підприємством розроблені «Заходи з виконання Програми відновлення роботи та виходу із кризи аеропорту «Бориспіль». Але в умовах невизначеності щодо періоду завершення воєнного стану, питання відновлення авіапасажирських перевезень залишається складним і вкрай чутливим до будь-яких зовнішніх факторів. Для відновлення

України у післявоєнний період необхідно проводити ефективну роботу по залученню коштів іноземних інвесторів, фондів, міжнародних фінансових установ.

Реалізація проекту створення нового вантажного терміналу з пропускною спроможністю 150 тисяч тонн на рік дозволить підприємству перетворитися у вантажний авіахаб за європейськими стандартами. Це буде сприяти забезпеченню транзиту вантажів між великими економічними центрами світу, такими як Азіатсько-Тихоокеанський регіон та Європейський союз, а також стане одним із стратегічних напрямів розвитку України відповідно проекту Плану відновлення України авіаційної галузі.

Список літератури:

1. Пояснювальна записка до фінансового плану Державного підприємства «Міжнародний аеропорт «Бориспіль» на 2023 рік. URL: [https://mtu.gov.ua/files/ ДП%20МА%20Бориспіль%20ПЗ_ФП_2023.pdf](https://mtu.gov.ua/files/ДП%20МА%20Бориспіль%20ПЗ_ФП_2023.pdf) (дата звернення 11.01.2024).
2. Додаток 17: Конвенція про міжнародну цивільну авіацію: Безпека. К. : ICAO, 2006. 41 с.
3. Пояснювальна записка до фінансового плану Державного підприємства «Міжнародний аеропорт «Бориспіль» на 2023 рік. URL: [https://mtu.gov.ua/files/ ДП%20МА%20Бориспіль%20ПЗ_ФП_2023.pdf](https://mtu.gov.ua/files/ДП%20МА%20Бориспіль%20ПЗ_ФП_2023.pdf) (дата звернення 11.01.2024).
4. Проект Плану відновлення України. Матеріали робочої групи «Відновлення та розбудова інфраструктури». URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/recoveryrada/ua/restoration-and-development-of-infrastructure.pdf>. (дата звернення 12.01.2024).
5. В Україну приїхало керівництво авіакомпанії Ryanair, аби обговорити відновлення польотів після закінчення війни. URL : <https://suspilne.media/532819-v-ukrainu-priihalo-kerivnictvo-ryanair-obgovoruut-vidnovlenna-polotiv-pisla-vijni/> (дата звернення 12.01.2024).
6. Концепція розвитку міжнародного аеропорту «Бориспіль» на період до 2045 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 8 травня 2019 року №293-р. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/uploads/public/5cd58f430/5cd58f430e10f609187834.doc> (дата звернення 11.01.2024).
7. Про державно-приватне партнерство : Закон України від 01 лип. 2010 р. № 2404-VI. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/LF2NR01A>. (дата звернення 12.01.2024).

8. Інвестиційна привабливість підприємства та методики її оцінювання. URL: <http://www.m.nauka.com.ua/?op=1&j=efektyvna-ekonomika&s=ua&z=2132>. (Дата звернення 02.11.2023).

9. Статут Державного підприємства «Міжнародний аеропорт «Бориспіль» (нова редакція), затверджений наказом Міністерства інфраструктури України від 06 липня 2017 року №340. Київ, 2017.

Vysotska I.I., Soloviova O.O., Sokolova O.Ye., Borets I.V., Valko A.M. STRATEGIC DEVELOPMENT OF THE AIRPORT “BORYSPIL” IN THE POST-WAR PERIOD

The article discusses the activities of the International Airport “Boryspil” in the context of uncertainty in the external environment caused by the negative impact of the new coronavirus disease (COVID-19) pandemic and military action that began in early 2022. It was found out that on February 24, 2022, the airspace of Ukraine was closed to civilian airspace users. This led to the interruption of the airport’s operations. The directions of Boryspil Airport strategic development in the post-war period were determined in accordance with the Draft Recovery Plan of Ukraine developed by the working group on infrastructure recovery and development in July 2022. One of the key areas of Boryspil Airport economic development in the long term is the development and maintenance of the airport infrastructure, namely the implementation of the airport “hub” development strategy. The strategy of airport development as a “hub” is aimed at attracting more transit passengers from foreign markets. The historical development of the airport was studied, which showed that in the long term passenger traffic is increasing. Over two decades, the average annual growth in passenger traffic at the airport is 13.0%. For two decades, the average annual growth of the airport passenger traffic has been 13.0%. The criteria that influence the elaboration of an economic development strategy and the speed of the airport operating activities recovery are determined. Recommendations for aviation security at international airport are provided. The development of cargo infrastructure is also one of the main directions of the economic strategy. In order to increase the cargo flow through Boryspil Airport and improve the quality of cargo and mail transportation services, the creation of a Multimodal Cargo and Logistics Center (MC&LC) at Boryspil International Airport is proposed, which is planned to be implemented by Ryanair on the terms of public-private partnership. The efficiency of the investment project for the formation of the multimodal cargo and logistics center at Boryspil Airport is calculated.

Key words: airport, air transportation, aviation safety, infrastructure development, aviation transport hub, investment project.

Вишневецький Д.О.

Одеський національний морський університет

Вишневецька О.Д.

Одеський національний морський університет

ВИЗНАЧЕННЯ ПРІОРИТЕТНОГО ПІДХОДУ ЩОДО ВІДБОРУ ІНФОРМАЦІЇ ПРИ ОРГАНІЗАЦІЇ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Досліджено складові сучасного конкурентного середовища в морській судноплавній галузі. Відзначено, що навіть за умови однакового стану середовища (системи), малозначущі фактори для однієї групи (вантажна база, тип суден, форма судноплавства) можуть мати принципово важливе значення для іншої, в силу їхньої специфіки.

Наприклад, якщо мова заходить про лінійне судноплавство, то в першу чергу, як правило, мається на увазі перевезення вантажів у контейнерах. У той же час коли вантажі доставляються окремими рейсами, то їй більше властиве використання універсальних суден. Тим не менш, існують ситуації, в яких більш актуальним є саме застосування універсальних суден, які будуть працювати на лінії, наприклад, як проектні судна для доставки різних великогазових вантажів, доставка яких спеціалізованими судами була б вкрай невигідна або неможлива.

Виявлено, що при організації вантажних перевезень важливо розкласти пріоритети наступним чином:

– виявити обов'язкову групу факторів (інформаційних потоків), які при тому чи іншому етапі планування, у тих чи інших умовах відіграють визначальне значення, через що мають бути досконало вивчені та враховані;

– визначити додаткову групу факторів, які здатні скоригувати попередню інформацію, дати більш широке розуміння проблеми та сприяти отриманню конкурентної переваги та врахувати їх при прийнятті рішення (наскільки це можливо та доречно);

– відсікти інформацію, яка не сприяє кращому розумінню проблеми. Несе у собі деталі, рішення, експертні оцінки, врахування яких не веде до поліпшення бажаного результату.

Відзначено антагоністичну сутність процесів вибудовування пріоритетів, відбору інформації та прийняття остаточних рішень при організації вантажних перевезень у сучасному висококонкурентному середовищі.

Безумовно, більш повне та детальне вивчення поточної проблеми може дозволити оволодіти конкурентною перевагою. Однак, невиправдані витрати часу на обробку додаткової інформації можуть призвести до «втрати» вантажу, судна, клієнта і як результат – втрати потенційного прибутку.

Ключові слова: лінійне судноплавство, трампове судноплавство, контейнеровоз, універсальне судно, організація вантажних перевезень, фрахтовий ринок, розклад роботи флоту, судноплавна компанія.

Постановка проблеми. Для світового фрахтового ринку, на якому здійснюються угоди щодо фрахтування та відфрахтування суден, властива наявність величезного потоку інформації. Дані про різні форми судноплавства, типи суден, вантажі в різній тарі та пакуванні, тарифну політику, спеціалізацію регіонів та рівень їх економічного розвитку, ступінь розвитку транспортної інфраструктури, правові аспекти та багато іншого – все це в цілому є критично важливим масивом інформації для гравців, що здійснюють свою діяльність на ринку морських транспортних перевезень.

Можливість своєчасно отримати доступ до такого великого масиву інформації – бажане, але

складне завдання. А в умовах відсутності необхідних технологій – недосяжне. Тому найважливішою умовою для виникнення фрахтового ринку як такого стала поява нових, передових засобів зв'язку. Промислова революція XVIII–XIX століття заклала важливі передумови для подальшого створення таких технологічних умов, без яких важко було б уявити сучасне судноплавство.

У нинішніх реаліях не бракує інформації та джерел її отримання, а сучасні засоби комунікації максимально спрощують і прискорюють її пошук. Крім того, ринок повний фахівців, готових надати свої послуги, якщо компанія не має власних потужностей, знань або досвіду для вирішення тих чи інших завдань.

Таким чином, на сьогоднішній день, для гравців, які здійснюють свою діяльність на ринку транспортних послуг, всі необхідні умови для ефективного функціонування вже створені.

Однак, на практиці подібний надлишок інформації породив проблему, подібну до тієї, з якою судноплавній галузі доводилося мати справу ще до виникнення фрахтового ринку. Надлишок інформації, з якою необхідно працювати, надто багато гравців, з якими доводиться мати справу і надто багато факторів, які необхідно враховувати. При цьому часу на обробку всього цього потоку даних та своєчасне прийняття вірного рішення критично мало.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасній судноплавній галузі властивий високий рівень конкуренції. У вітчизняних та іноземних дослідженнях приділяється велика увага підвищенню ефективності функціонування морських транспортних підприємств при організації вантажних перевезень. Світова наукова база збагачується величезною кількістю здобутків. Однак при цьому, зростає і кількість різноманітних факторів, які необхідно враховувати окремому транспортному підприємству.

Так, питання організації та управління роботою різних суден було досліджено у роботах [1, 5, 11, 17, 18].

У роботах [2, 3, 8, 21] було розглянуто комерційні умови роботи тоннажу на сучасному фрахтовому ринку. Можливі напрямки та перспективи розвитку сучасних транспортних підприємств при організації вантажних перевезень були викладені у роботах [4, 9, 15, 16, 19, 22].

Робота морського транспорту в умовах невизначеності розглянута у роботах [6, 7]. Безпосередньо самі питання організації роботи флоту в сучасних умовах досліджено у роботах [10, 12–14, 20].

Наявність великої кількості корисної інформації з одного боку дозволяє підприємству покращити свою ефективність, а з другого боку висуває перед ним проблему пошуку зручного механізму відбору та аналізу отриманої інформації. Така проблема обґрунтовується необхідністю своєчасно зорієнтуватися на ринку перевезень аби заволодіти конкурентною перевагою.

Метою статті є визначення найдоцільнішого напрямку пошуку інформації задля ефективного вибудовування пріоритетів при організації вантажних перевезень в умовах сучасного середовища, якому властивий високий рівень конкуренції.

Виклад основного матеріалу. Чинник часу завжди відігравав важливе значення для судноплавної галузі. Раніше це пояснювалося від-

сутністю сучасних засобів зв'язку, відсутністю і навіть незатребуваністю цілих видів послуг та фахівців, які їх надають. Для транспортної галузі на той час характерні примітивні засоби завантаження вантажів у портах, технічно недосконалі транспортні засоби (вітрильний і паровий флот), які у більшій мірі залежали від погодних умов і великих відстаней перевезень. Зважаючи на все вищезазначене, виконання будь-яких операцій та пошук необхідної інформації займав, за сучасними мірками, занадто багато часу.

Типові складові сучасного конкурентного середовища у морській транспортній галузі зображені на рисунку 1.



Рис. 1. Складові конкурентного середовища при організації вантажних перевезень

У нинішніх реаліях технологічний прогрес і наявність сучасних засобів зв'язку настільки прискорили отримання інформації та виконання всіх операцій, що часу на грамотне та ефективне планування своєї діяльності стало ще менше.

Саме тому в сучасному динамічно конкурентному середовищі, що динамічно змінюється, дуже важливо вміти своєчасно знаходити у величезному потоці інформації найнеобхідніше, щоб не втратити конкурентну перевагу.

Подібний висновок підводить нас до ряду важливих положень, якими слід керуватися при ухваленні рішень.

1. Має місце так званий ліміт корисної інформації, після досягнення якого, додаткова інформація дає лише незначне покращення результату, при цьому значно зростає час на її відбір та аналіз.

Прагнення в кожний момент часу мати всю повноту інформації зрозуміле і логічне. Але чи у всіх ситуаціях це виправдано? Чи вартий пошук додаткової інформації надмірних зусиль, якщо приріст результативності від цієї інформації незначний, а час на прийняття рішення обмежений?

Практика демонструє, що різне середовище диктує свої умови щодо необхідної повноти інформації для ефективного функціонування у тій чи іншій ситуації.

Можна як приклад провести паралелі з різними формами судноплавства. При лінійній формі організації роботи суден, на етапі проектування всебічному вивченню всіх можливих аспектів майбутньої лінії, основних та другорядних факторів, прямих та непрямих тощо, приділяють значну увагу.

Робиться це тому, що потенційна лінія працюватиме багато років. Тому досконале вивчення всіх можливих аспектів проблеми у цій ситуації має важливе значення. У той час як на етапі безпосередньої експлуатації лінії розгляд багатьох питань втратить свою актуальність, оскільки там буде задіяний типовий флот, який перевозить типові вантажі (або вантажі в уніфікованій тарі, наприклад, в контейнері), за узгодженим розкладом і за єдиним документом.

Принципово інакші справи в трамповій формі судноплавства. Там немає довгострокових договорів, немає горизонту планування тривалістю кілька років, різні судна, різні вантажі, різні порти, тощо. Рішення необхідно приймати тут і зараз, керуючись досвідом та інформацією, яку можна отримати за обмежений відрізок часу.

2. Надмірний обсяг інформації веде до непотрібного нагромадження кінцевої моделі прийняття рішення, ускладнює розуміння проблеми, може ввести в оману при розміщенні пріоритетів, веде до спотворення кінцевого результату.

Таким чином, надлишок інформації фактично стає еквівалентом її повної відсутності. Якщо у разі нестачі інформації учасники транспортного процесу зазнають труднощів через те, що багато часу витрачається на отримання цієї інформації, то у випадку з її надлишком надмірну кількість часу необхідно витратити на ідентифікацію корисної інформації та відсікання малозначущої або навіть шкідливої. Як в першому, так в другому випадку це тягне за собою нездатність своєчасно прийняти правильне рішення, що згодом негативно позначиться на ефективності функціонування морського транспортного підприємства.

Величезні масиви інформації можуть вимагати залучення додаткового персоналу для їх сво-

єчасної обробки, що в умовах обмеженості часу та ресурсів може виявитися непосильним завданням. Зважаючи на це, доведеться при обробці інформації обходитися наявними силами, що може спричинити неправильну розстановку пріоритетів і, як результат, неправильне цілепокладання. Також надмірна увага до малозначних чи навіть непотрібних аспектів проблеми може підштовхнути керівництво до помилкового рішення, щодо залучення до виконання цієї роботи додаткових співробітників, що у свою чергу неминуче спричинить не виправдане розростання штатів, нераціональне використання коштів, що у великих масштабах може також сприяти зростанню корупції.

3. Відбір інформації слід проводити з чіткого розуміння для якого кола фахівців й у чиїх інтересах проводиться дослідження.

Розуміння цього питання важливо тому, що ринок морських транспортних послуг включає гравців, чиї інтереси можуть не тільки збігатися, а й прямо суперечити один одному. Це означає, що певні аспекти тієї чи іншої проблеми можуть представляти вкрай важливе значення для однієї сторони і бути марними для іншої. Тобто, для одних учасників транспортного процесу певна інформація може не становити жодної цінності, тоді як для інших своєчасне володіння подібною інформацією дозволило б їм оволодіти вирішальною конкурентною перевагою.

4. Врахування експертних висновків іншої групи фахівців, чиї інтереси перебувають в іншій площині (навіть якщо ця інформація є абсолютно достовірною), може не тільки не сприяти отриманню більш цілісної картини, а навпаки – призвести до розмиття основної проблеми і в результаті неввірного розміщення пріоритетів.

Це не найочевидніша теза, логічність якої, тим не менш, стає незаперечною коли розглядається на конкретних прикладах. Будь-яке підприємство, зокрема підприємство морського транспорту зазвичай включає у себе широкий спектр різних фахівців. Це можуть бути фахівці з експлуатації, маркетингу, менеджменту, відповідальні за юридичні питання, економічні, питання охорони, пожежної безпеки та інше. Кожен із цих відділів націлений на виконання єдиної мети. Тим не менш, при детальному розгляді їх діяльності стає очевидно, що на шляху до досягнення єдиної мети, завдання, які кожен з цих відділів ставить перед собою, можуть істотно відрізнятись, а іноді навіть принципово суперечити одне одному. Пріоритети, а також спектр питань, які являють важ-

ливе значення в кожному з цих відділів, також можуть суттєво відрізнятись.

Так, якщо розглядати операції з завантаження та вивантаження контейнерів, то з погляду технології, для фахівця, який займається питаннями експлуатації, не має жодного значення, з якими контейнерами доводиться мати справу – завантаженими або порожніми. Який вантаж усередині контейнера теж не має особливого значення. З іншого боку, для фахівців, які займаються юридичними питаннями, вміст контейнера відіграє принципове значення і стає важливим аспектом під час здійснення своєї безпосередньої діяльності.

Крім цього, велика увага повинна приділятися питанням безпеки перевезень ергономічності підвищення ефективності. Проте вирішення цих питань може бути пов'язане з істотними грошовими витратами, що може суперечити основній меті компанії – максимізувати прибуток.

Можна навести інший приклад. Перед фахівцем, відповідальним за пожежну безпеку підприємства, стоїть завдання проінформувати найбільшу кількість співробітників про всі можливі запасні входи та виходи з території підприємства, подбати про те, щоб додаткові входи та виходи були відкриті та їхнє місцезнаходження було відоме кожному співробітнику. Якщо ж розглянути які завдання стоять перед фахівцем відповідальним за охорону даного підприємства від стороннього проникнення, то виявиться, що у нього принципово інші пріоритети. Він наполягатиме на тому, щоб усі додаткові входи та виходи були закриті, а інформація про їхнє розташування була обмежена.

Прикладів подібних конфліктів у різних відділах, конфліктів завдань і конфліктів пріоритетів можна знайти велику кількість. Тим не менш, подібна суперечливість інтересів не має підштовхнути до помилкового висновку про те, що наявність якогось відділу або фахівця є зайвию або питання якими він займається не відіграють великого значення. Навпаки, при всій своїй суперечливості, всі ці відділи націлені виконання єдиної мети. Саме тому важливість розуміння цього аспекту полягає в тому, щоб на кожному етапі вирішення того чи іншого завдання грамотно розставити пріоритети, розподілити ресурси з тим, аби належним чином акумулювати зусилля всіх співробітників підприємства на досягнення єдиної мети.

5. Пріоритети розставляються, виходячи з інформації, що об'єктивно відображає стан середовища (системи). Через це, якщо під впливом внутрішніх або зовнішніх факторів зміню-

ється стан середовища (системи), то це може спричинити і зміну пріоритетів.

При розстановці пріоритетів важливо розуміти, що вони не є ультимативними, що існують поза місцем і часом. Навпаки, виходячи з місця і часу, де здійснюватиметься та чи інша діяльність підприємства морського транспорту, відповідним чином, іноді навіть принципово, можуть змінюватись і пріоритети. Крім того, під впливом різних зовнішніх факторів підприємства водного транспорту можуть вдаватися до рішень, найчастіше невластивих їх специфіці.

Як приклад можна знову навести лінійну форму судноплавства. Коли мова заходить про лінійний спосіб організації роботи суден, то зазвичай вона передбачає терміновість доставки вантажів, їх пакування в контейнери, перевезення за єдиним документом і жорстку прив'язку до розкладу. Тим не менш, в рамках самого ж лінійного судноплавства можливі й винятки, адже лінійна форма судноплавства має велику кількість різних класифікаційних ознак.

Наприклад, за принципом організації роботи флоту можуть виділяти лінії термінові та регулярні. Якщо для термінових ліній усі вищеперелічені чинники є невід'ємними складовими, то з регулярними лініями ситуація принципово інакша. По-перше, для таких ліній характерна відсутність належним чином обладнаних портів, відсутність сучасного обладнання, необхідного для своєчасного та ефективного обслуговування сучасних суден контейнеровозів. Зважаючи на це – стає неможливим і їх оперативна обробка. Якщо немає можливості швидко обробити великі судна контейнеровози, значить не може бути й мови про будь-яку терміновість доставки. Внаслідок цього немає можливості організувати відправлення та прибуття вантажів за розкладом. Тому для подібних ліній і пріоритети розставляються інакше. Для цих портів може бути завдання, наприклад, здійснити захід один чи 2 рази на місяць, чого буде достатньо.

Як видно з прикладу вище, у першому та у другому випадку йдеться про лінійну форму судноплавства. Тим не менш, завдання в них ставляться принципово різні і навіть суперечать одне одному, а отже, іншим способом розставляються і пріоритети. Важливість розуміння даного аспекту полягає в тому, щоб організувати роботу спираючись на грамотну оцінку тієї ситуації, в якій здійснюватиметься робота флоту, щоб не ставити нездійсненні завдання досягнення яких може бути скрутним або взагалі неможливим.

6. На різних етапах планування є різні пріоритети.

Суть цього положення можна також розглянути на прикладі лінійної форми судноплавства. Наприклад, на етапі проектування лінії важливу роль становлять питання, які на даний момент ще не пов'язані безпосередньо з процесом перевезення. Це питання місця зародження вантажопотоку та їхнього місця споживання. Де знаходяться центри з видобутку сировини, де розташовані точки виробництва та споживання готової продукції. Важливе значення мають питання географії, клімату, економічного розвитку та транспортної забезпеченості того чи іншого регіону.

На етапі експлуатації лінії на перший план висуваються інші питання. Насамперед – це питання цілісності розкладу. Для лінійного судноплавства це питання відіграє ключову роль через те, що витрати часу в одному якомусь порту можуть згодом спричинити ще більшу втрату часу та коштів. Також важлива роль відводиться питанням наповнення контейнерів вантажами, а суден

контейнеровозів – контейнерами. Важливу роль відіграють питання надлишку або нестачі тоннажу і як здійснювати розстановку флоту з урахуванням цих факторів.

Роль та взаємозв'язки різноманітних факторів, що впливають на стан системи наведено на рисунку 2.

7. При тому самому стані середовища (системи), для різних форм організації роботи флоту і навіть типів суден, пріоритети можуть кардинально відрізнитися.

Для підтвердження цього положення тези можна розглянути технологію перевезення зерна. Зважаючи на те, що зерно може перевозитися в мішках, насипом і в контейнерах, то відповідним чином воно може перевозитися і на різних судах. Застосування різних суден для перевезення зерна в тій чи іншій тарі, пакуванні або без неї може бути доцільним в одних ситуаціях і не вигідно в інших. Перевезення на суднах типу балкер може бути виправдано, коли мета полягає в доставці великої кількості вантажу

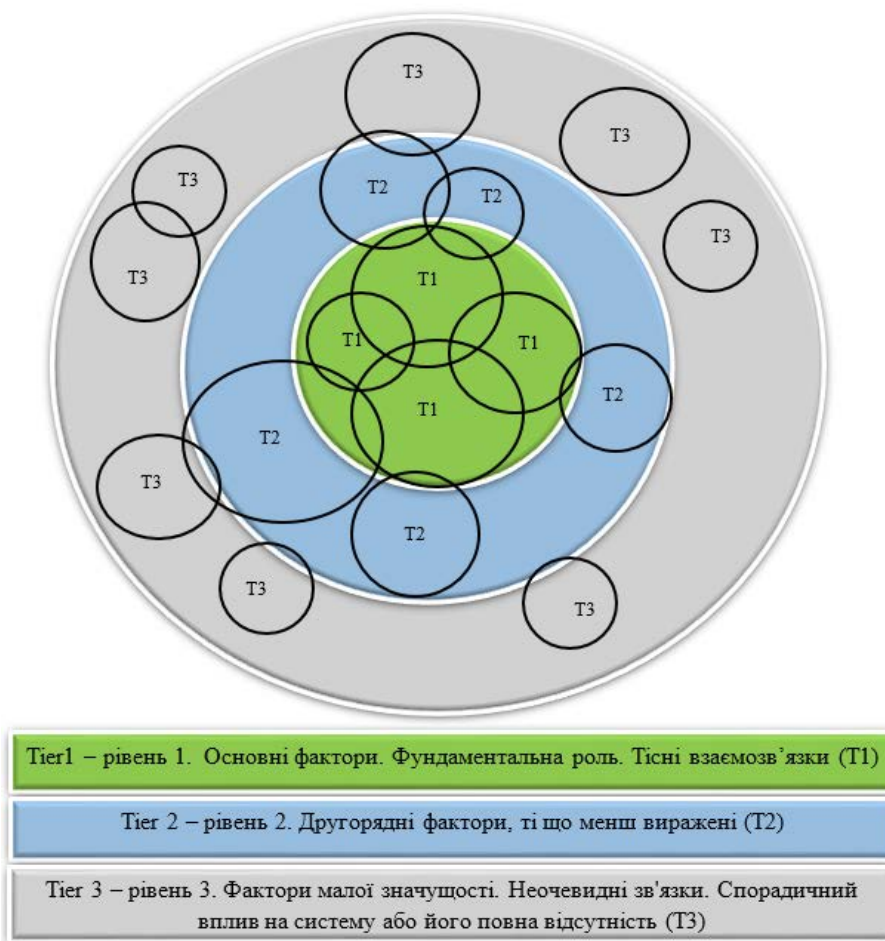


Рис. 2. Ієрархія факторів та їх роль у формуванні стану системи/середовища

на великі відстані, коли фактор часу вирішальної ролі не відіграє – у пріоритеті ціна доставки. Протилежна ситуація, коли здійснюється перевезення зерна у контейнерах. На перший план висувається вимоги екологічності, безпеки, своєчасності доставки. Ціна грає у цій ситуації менш пріоритетне значення – значно більша роль відводиться часу доставки. Також, при доставці зерна в контейнерах йдеться про невеликі партії. Перевезення зерна в мішках може бути доцільним, коли необхідно доставляти вантажі до слабо обладнаних портів, де немає належного перевантажувального обладнання для своєчасної їх обробки.

У всіх трьох ситуаціях ми розглянули різні способи доставки зернових вантажів, проте як можна побачити, застосування кожного з них було продиктовано тим, яке стояло завдання і в яких умовах необхідно здійснювати перевезення.

8. Можна говорити про так звану групу пріоритетних факторів, які завжди актуальні, і завжди повинні бути враховані в першу чергу. Або навпаки – зазвичай малозначущі і тому мають враховуватися за залишковим принципом.

Це було наочно продемонстровано на наведених вище прикладах. Не потрібно щоразу досліджувати все з нуля. Кожна форма судноплавства, типи суден, рід вантажу – кожній з цих груп характерні свої особливості. На основі цього вже можна говорити про те, які завдання стоять перед ними і в якій ситуації вигідно вдаватися до тих чи інших.

Як до різних форм судноплавства, так і до різних типів суден, виходячи з їх можливостей до них висуваються і різні завдання. В одному випадку вирішальну роль відіграє фактор часу в іншому – вартість доставки. Якісь судна більшою мірою пристосовані для перевезення великої кількості вантажів, інші – малих партій за малих витрат часу.

Склад факторів, визначають стан системи зображено на рисунку 3.

Таким чином, слід належним чином вибудувати систему пріоритетів. Розуміння даних аспектів дозволяє не витрачати час на додаткове вивчення цих питань, а скористатися ним для прийняття правильного рішення.

Висновки. Результати дослідження, проведеного у даній роботі дозволили виявити важливе протиріччя, яке відображає антагоністичну сутність процесу прийняття рішень.

З одного боку, врахування додаткових факторів сприяє більш повному розумінню ситуації. Зна-



Рис. 3. Склад факторів, що впливають на стан системи

ння та розуміння нюансів та прихованих факторів дозволить краще розпорядитися наявними ресурсами, зменшити витрати та отримати конкурентну перевагу.

З іншого боку, надмірне акцентування уваги на малозначущих фактах і незначних деталях може спричинити розмите розуміння проблеми, зміну пріоритетів, неправильний розподіл ресурсів і як результат – втрату конкурентної переваги.

Мова не йде про принципове ігнорування потенційно надмірної інформації (оскільки явно зайва інформація в одних умовах може відіграти важливу роль в інших), а скоріше про правильний облік всієї наявної інформації в конкретний момент часу, коли із загального потоку, в потрібний момент і у потрібному обсязі виділяється головне та відсікається зайве.

Володіння всією повнотою інформації в кожен момент часу має важливе значення, оскільки при ухваленні рішення керівництво компанії може керуватися досвідом від раніше успішних операцій. Найчастіше це виправдано. Проте, ситуація у галузі може динамічно змінюватися, виводячи перший план інші, у минулому малозначущі чинники. І якщо при прийнятті рішення відштовхуватися виключно від досвіду, ігноруючи ці нові вхідні данні, це може ускладнити досягнення поставленої мети або навіть зробити її недосяжною.

Список літератури:

1. Вільшанюк М. С., Судник Н.В. Обґрунтування умов ефективного транспортування пшениці з портів України. Наукоємні технології ("Science-Based Technologies"). 2023. (1(57)), 101-107. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.57.17450> <https://jrn1.nau.edu.ua/index.php/SBT/article/view/17450>
2. Судник Н.В., Вільшанюк М.С. Комерційна експлуатація флоту та дослідження фрахтових ринків// Навчальний посібник. – Одеса, ОНМУ. – 2022. С. 103.
3. Рилов С.І., Коскіна Ю.О. Взаємозв'язок факторів визначення морського фрахту. *Методи та засоби управління розвитком транспортних систем*: Зб. наук. пр. Одеса: ОНМУ, 2005. Вип. 9. С. 169–178.
4. Onyshchenko S., Bondar A., Andrievska V., Sudnyk N., Lohinov O. Constructing and exploring the model to form the road map of enterprise development. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. №5/3(101) С. 33-42. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.179185>
5. Управління роботою суден-балкерів з урахуванням невизначеності умов їх експлуатації: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 / Вишневська Ольга Дмитрівна ; Одес. нац. мор. ун-т. – Одеса, 2018. – 26 с.
6. Організація транспортного процесу та управління роботою флоту на ринку міжнародного судноплавства. Ідентифікація невизначеності у системі доставки вантажів за участю морського транспорту: моногр. Ч. 2 / авт. кол. : О. Г. Шибаєв, Ю. В. Михайлова, О. В. Акімова [та ін.]. – Одеса : КУПРИЄНКО СВ, 2017. – С. 52–56.
7. Вишневська О. Д., Вишневський Д. О. Вплив відхилень параметрів роботи суден на хід протікання рейсу// Проблеми розвитку морського транспорту і туризму. Частина 2: серія монографій / [авт.кол. : Шибаєв О.Г., Коскіна Ю.О., Судник Н.В. та ін.] за ред. О.Г. Шибаєва. – Одеса: КУПРИЄНКО СВ, 2020 – С. 25–30.: іл., табл. – (Серія «Проблеми розвитку морського транспорту і туризму», Частина 2).
8. Вишневська О.Д., Вишневський Д. О. Урахування можливого негативного впливу виробничих та комерційних факторів в процесах управління роботою суден Вісник ОНМУ: зб. наукових праць, 2018.– Вип 2 (55). С. 120–126.
9. Vyshnevskya O.D., Vyshnevskiy D.O. Problems and perspectives of development in transport sector of Ukraine// Science for modern man: innovative engineering and technology, informatics, security systems, transport development, architecture./ [team of authors: Arshava E.A. (21), Ashhepkova N. (9), Buzovskiy V. (5), Vyshnevskya O.D. (17), Vyshnevskiy D.O. (17), and etc.] – 236 p. Monographic series «European Science». Book 4. Part 4. 2021. Published by: ScientificWorld-NetAkhatAV, Karlsruhe, Germany in conjunction with Institute «SE&E» ISBN 978-3-949059-12-4 DOI: 10.30890/2709-2313.2021-04-04
10. Вишневський Д. О., Вишневська О.Д. Сучасні підходи в організації вантажних перевезень на транспорті, як невід'ємний фактор розвитку регіону // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наукових праць, 2023. № 1 (68). – С. 147–155. DOI 10.47049/2226-1893-2023-1-147-155.
11. Вишневський Д. О. Методичні основи організації роботи універсальних суден на міжнародних лініях – Одеса: АО БАХВА, 2016. 21 с.
12. Організація транспортного процесу та управління роботою флоту на ринку міжнародного судноплавства. Оцінка потенційного обсягу транспортної роботи універсального флоту на перспективних напрямках : моногр. / авт. кол. : О. Г. Шибаєв, Ю. В. Михайлова, О. В. Акімова [та ін.]. – Одеса: КУПРИЄНКО СВ, 2016. С. 54–58.
13. Організація транспортного процесу та управління роботою флоту на ринку міжнародного судноплавства. Формування вартості перевезення в лінійному і трамповому судноплавстві : моногр. / авт. кол. : О. Г. Шибаєв, Ю. В. Михайлова, О. В. Акімова [та ін.]. – Одеса: КУПРИЄНКО СВ, 2016. – С. 113–116.
14. Організація транспортного процесу та управління роботою флоту на ринку міжнародного судноплавства. Формування агрегованих вантажопотоків для оцінки величини вантажоперевезень: моногр. Ч. 2 / авт. кол. : О. Г. Шибаєв, Ю. В. Михайлова, О. В. Акімова [та ін.]. – Одеса : КУПРИЄНКО СВ, 2017. – С. 52–56.
15. Вишневський Д. О., Вишневська О. Д. Фактори успішності функціонування підприємства морського транспорту. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*. 2023. Том 34(73) № 2. С. 106–114. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/19>
16. Onyshchenko, S., Vyshnevskya, O., & Vyshnevskiy, D. Justification of the optimal option and transportation parameters for export supplies using marine transport. *Technology Audit and Production Reserves*. 2023. 2(2(70)), 34–39. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.277804>
17. Дрожжин О.Л. Організація роботи суден контейнеровозів на фідерних лініях. – Одеса: «Одеська морська академія», 2018. 22 с.
18. Мельник О.М. Експлуатація неспеціалізованих суден при транспортуванні негабаритних і великогазових вантажів. – Одеса: «Одеська морська академія», 2021. 27 с.

19. Бутько Т.В., Шендер О.Е. Наукові підходи щодо удосконалення технології вантажних перевезень з урахуванням конкурентного середовища. *Зб. наук. праць ДонІЗТ*, 2013. № 33. С. 57–60.
20. Lapkin A. The Organization of Consecutive Voyages Operation by National Shipowners // Вісник Одеського державного морського університету: Зб. наук. пр. Випуск 5. – Одеса: ОДМУ, 2000. – С. 182–191.
21. Лапкін О.І., Онищенко С.П., Коскіна Ю.О. Теорія і практика фрахтових операцій. – О.: КУПІРІЄНКО СВ, 2017. 151 с.
22. Вишневський Д.О. Формування структури флоту та визначення перспективних напрямків його роботи. International scientific and practical conference. *Modern Directions Of Theoretical And Applied Researches*. Issue № 1(38). March 17-29. 2015. Одеса: КУПІРІЄНКО, 2015. С. 24–27. URL: <https://www.sworld.com.ua/konfer38/496.pdf>.

Vyshnevskiy D.O., Vyshnevskaya O.D. DETERMINATION OF A PRIORITY APPROACH FOR THE SELECTION OF INFORMATION DURING ORGANIZATION OF CARGO CARRIAGES

The components of the modern competitive environment in the maritime shipping industry have been researched. It is noted that even within the same state of environment (system), insignificant factors for one group (cargo base, type of vessels, form of shipping) can be fundamentally important for another, due to their specificity.

For example, when it comes to liner shipping, it primarily means the transportation of goods in containers, while when goods are delivered on the basis of consecutive voyages, the use of universal vessels is more typical for such case. However, there are situations when it is more relevant to use universal vessels that will operate on the line. For example, as project vessels for the delivery of various heavy cargoes, the delivery of which by specialized vessels would be extremely unprofitable.

It was revealed that during the organization of cargo carriages, it is important to set priorities as follows:

- identification of a mandatory group of factors (information flows) that plays a decisive role at a particular planning stage or under certain conditions, and therefore must be thoroughly studied and taken into account;*
- determination of an additional group of factors that can improve preliminary information, provide a broader understanding of the problem and contribute to gaining of a competitive advantage and thus, should be taken into account when making a decision (as far as it's possible and reasonable);*
- exclusion of the information that does not contribute to a better understanding of the problem. It contains details, decisions, expert assessments, the consideration of which does not lead to an improvement in the desired result.*

Of course, a more complete and detailed study of the current problem may give a competitive advantage. However, unjustified time spent on the processing of additional information can lead to the “loss” of cargo, vessel, client and, as a result, loss of potential profit.

Key words: *liner shipping, tramp shipping, container carrier, universal ship, organization of cargo carriages, freight market, schedule of fleet work, shipping company.*

Гаража О.П.

Національний авіаційний університет

Шевчук Д.О.

Національний авіаційний університет

Гаврилюк С.О.

Національний авіаційний університет

ЕКОНОМІЧНА ДІЯЛЬНІСТЬ АВІАЦІЙНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ: АНАЛІЗ ТА ВИКЛИКИ

Економічна діяльність авіаційної галузі забезпечує національні інтереси стосовно ефективного функціонування транспортної інфраструктури господарського комплексу, сталого розвитку національної економіки, Авіаційна галузь сприяє розвитку експортно-імпорتنих та транзитних перевезень вантажів і пасажирів. Виявлено, що сучасна авіаційна галузь сприяє ліквідації головних потреб пасажирів та вантажів для різних галузей економіки за обсягом, проте якість не відповідає світовим стандартам. Виявлено, що конкурентоспроможність та ефективність авіаційної галузі, нормативно-правове забезпечення та розвиток приватно-державного партнерства, залучення приватних інвестицій є необхідними принципами для сталого розвитку авіаційної галузі та її економічної спроможності на світовому ринку організації авіаційних перевезень. Доведено, що для створення міцної національної безпеки та соціально-економічного розвитку країни необхідно сучасне оновлення матеріально-технічної бази авіаційних підприємств, державна фінансова підтримка, досконале техніко-технологічне обслуговування транспортної інфраструктури. Проаналізовано, що на ефективність діяльності авіаційної галузі впливають масова контейнеризація авіаційних перевезень, інтегрованість з іншими системами у послідовному ланцюзі доставки вантажу, глобалізаційні процеси організації трансконтинентальних авіаційних перевезень, зниження цін на авіаційні перевезення для транспортних сполучень міжрегіонального рівня. Виявлено, що авіаційна галузь як складова частина транспортного комплексу України вимагає корінних структурних змін та оновлення матеріально-технічної бази, впровадження новітніх технологій перевезення організації авіаційних перевезень, впровадження найкращого світового досвіду щодо надання якісного обслуговування пасажирів та доставки вантажів згідно із сучасними потребами ринкової економіки, європейських та світових норм і стандартів якості. Встановлено, що ліквідація ключового аспекту критичного становища авіаційної галузі України та досягнення її сталого розвитку із залученням інноваційно-інвестиційних заходів потребує впровадження державної підтримки та розвитку приватно-партнерських відносин.

Ключові слова: авіація, стратегія, фінанси, економіка, підприємство, імпорт, експорт, рентабельність.

Постановка проблеми. Сучасна економічна діяльність відбувається в складних та динамічних процесах мінливості як внутрішніх, так і зовнішніх ринкових факторів, виявлення яких вимагає системного підходу, який ґрунтується на угрупованні диверсифікованих теоретичних напрямків економіки. Підтримка різноманітних форм підприємництва та організацій для забезпечення стабільності та сталого розвитку посилює складність цієї проблеми, оскільки мета та задачі суб'єктів економічної діяльності можуть зазнавати змін, що неоднозначно впливають на фінансово-економічні показники функціонування підприємств та організацій авіаційної галузі.

Аналіз досліджень та публікацій. Стан та проблеми функціонування транспортної галузі еконо-

міки нашої держави, формування інвестиційних стратегій при впровадженні інфраструктурних проєктів, оновлення транспортної інфраструктури та джерела для модернізації транспортної галузі широко розкриті у працях вітчизняних науковців: Н. М. Цебенко [1], Є. С. Чупрін, Д. В. Кондратенко, Є. М. Гелеверя [2], Н. А. Хрущ [3], В. М. Гурнак, І. О. Хоменко, Л. М. Волинець [4].

Концепція сталого розвитку у транспортній галузі з позицій економічного, екологічного та соціального підходу до її реалізації у транспортній системі із угрупованням основоположних принципів за чотирма напрямками запроваджена О. В. Бойко, З. П. Двудіт [5]. Вплив глобалізаційних факторів на сучасний розвиток транспортної

галузі з визначенням проблем та суперечностей формування ролі держави, спрямування її політики в умовах європейської інтеграції досліджено у роботах В. Л. Дикань, М. В. Корінь [6], Ю. О. Крихтіна [7]. Наразі у науковій літературі продовжуються дискурси стосовно узгодження сукупності факторів впливу на функціонування транспортної галузі, тому динамічність та мінливість розвитку ринку та поглиблення глобалізаційних процесів є актуальною та потребує більш детального дослідження.

Мета статті: дослідити функціонування, результативність та виклики економічної діяльності авіаційної галузі в транспортній системі України.

Виклад основного матеріалу. Динамічний економічний розвиток України може бути досягнутий на основі створення ефективної авіаційної галузі в транспортній системі України. Авіація є однією із стратегічно вагомих галузей національної економіки і інтеграційного компоненту в глобальну світову транспортну мережу. Спільне використання об'єктів авіаційної інфраструктури спонукає до активізації міжнародних економічних зв'язків та посилює світові напрями глобалізаційних відносин. Приблизно 1,1 % ВВП України у 2018 році створено вхідними потоками сектору повітряного транспорту та іноземними туристами, що прибули повітряним транспортом [8, с. 139]. Авіаційний транспорт характеризується високим середньорічним темпом зростання на рівні 10 % за останні 55 років на світовому ринку [8, с. 133]. Водночас, розвиток авіаційної галузі підтримує високий рівень продуктивності і поступове збільшення запитів на авіаційні послуги від підприємств інших галузей національної економіки, що обґрунтовано швидкою доставкою термінових

вантажів, маневреністю та оперативністю складання нових маршрутів, масштабність охоплення територій, гнучкість при зміні пасажиропотоків або вантажообігу. Авіаційні перевезення забезпечують швидке спрямування товарно-пасажирських та фінансово-інвестиційних потоків, прогнозно-інформаційних задумів розбудови регіонів, міст, країни в цілому. За останнє десятиліття експорт повітряних послуг знизився на 30 %, а імпорт зменшився лише на 11 %. Співвідношення експорту до імпорту авіаційних послуг найвище у 2020 р. – майже у 2,5 рази, а найменше у 2015 р. – майже у 1,8 рази (табл. 1).

Через територію України проходять важливі транзитні вантажопотоки, які забезпечують максимальний транспортний потенціал на основі вигідного географічного положення країни. Загальновідомо, що зручна транспортна інфраструктура стає базисом для організації та розвитку економіки держави, міжнародного співробітництва, приєднання до світових союзів та спільнот. Завдяки транспорту відбувається рух продукції від виробника до пунктів обігу та розподілення товарів між споживачами, тобто транспортна діяльність постійно забезпечує безперервність циклічного процесу товаровиробництва та товарообігу. Відтак, транспортна інфраструктура одночасно забезпечує стабільний розвиток національної економіки та підвищує якість життя населення країни. З цієї причини, сталий розвиток транспортної системи та стійка робота фізичних та юридичних осіб у сфері надання транспортних послуг підприємствам та населенню стає вкрай актуальним та економічно важливим важелем у розвитку економіки будь-якої держави. Ключовими елементами транспортної інфраструктури України є: автомобільний, залізничний, водний, трубопровідний та авіаційних транспорт. Проте,

Таблиця 1

Аналіз експортно-імпортової діяльності на ринку послуг повітряного транспорту за період 2012–2021 рр.

Роки	Експорт послуг повітряного транспорту, тис. дол. США	Імпорт послуг повітряного транспорту, тис. дол. США	Експорт/імпорт повітряних послуг, %
2012	1485096,8	635913,1	234
2013	1299127,1	628311,8	207
2014	1071262,5	431037,6	249
2015	853618,5	466937,6	183
2016	882840,3	357465,0	247
2017	1091775,1	452397,3	241
2018	1221610,7	695720,1	176
2019	1419720,8	757823,3	187
2020	802191,7	319904,2	251
2021	1045326,7	566777,9	184
2021/2012, %	<i>70</i>	<i>89</i>	<i>79</i>

*Розраховано авторами на основі [9].

недоліком української транспортної системи стає розбіжність із європейськими стандартами, яка потребує реструктуризації та оновлення її складових елементів та приведення національних стандартів до європейських норм. Особливої та першочергової уваги заслуговують глобальні транспортні коридори, які з'єднують Україну та Європейський Союз. Подібна гармонізація включає оновлення рухомого складу, розширення залізничних і автомобільних шляхів, пристосування національної транспортної інфраструктури до міжнародних транспортних коридорів, нормативно-правове урегулювання пересування транснаціональних вантажів, осучаснення та модернізація авіаційного парку, сприяння та оновлення річкового та морського флоту на всіх рівнях його розподілу. Авіаційні перевезення вантажів становлять 0,1 млн т або 0,01 % від загального обсягу перевезень, що свідчить про низький рівень використання авіації для вантажообігу. В Україні найбільша кількість вантажів перевозиться автомобільним (більше 70 %) та залізничним транспортом (біля 20 %). Найменша кількість перевезень у авіаційному та водному транспортуванні вантажів. Трубопровідний транспорт використовується в межах 5–10 % для транспортування газу, нафти, тощо через територію країни у країни Європейського Союзу (табл. 2).

Наслідком інституціональних змін у внутрішній та зовнішній політиці транспортної сфери стало неефективне управління виробничою та фінансово-економічною діяльністю. Поряд з цим ураження авіаційної галузі відбулося на фоні загальносвітової економічної кризи, викликані пандемією. Карантинні заходи спричинили зменшення пасажиропотоку у авіаційній галузі, яка характеризується найбільшою часткою пасажирських перевезень серед інших видів транспорту. Зменшення фінансової стійкості авіаційної галузі не тільки негативно вплинуло на транспортну спроможність та розвиток транспортної системи країни, але й сповільнило розвиток національної економіки. Значний негативний вплив на економічний стан цивільної авіації мала гостра зовнішньополітична ситуація, впровадження рекомендацій з безпеки польотів багатьма міжнародними інституціями, прокладання маршрутів повз небезпечний повітряний простір. Починаючи з 2021 р. відбулося відновлення попиту на повітряні перевезення туристичними маршрутами, що мало позитивний вплив на ринку авіаційних перевезень. Базовим для порівняння визначено 2019 р., тому що в той час не було введено протиепідемічних обмежень. Таким чином, відновлення перевезень у 2021 р. дорівню-

вало 9348,1 тис. пасажирів або 68,2 % порівняно із 2019 р. [11]. Активізували авіаційну діяльність на ринку авіаційних перевезень 16 українських авіаліній. Найбільші обсяги авіаційних перевезень (93 %) здійснили чотири провідні авіалінії: «Міжнародні авіалінії України», «Скайап», «Азур Ейр Україна» та «Роза вітрів» [11]. З березня 2021 року запрацювала нова авіакомпанія «Біз Ейрлайн», яка зайняла п'яту сходинку цього рейтингу [11]. Відтак, 9 вітчизняних авіаційних компаній проводили регулярні польоти до 42 різних країн світу, забезпечивши вдвічі більшу кількість пасажирів (2608,9 тис. чол.) транспортними послугами у 2021 р., ніж у порівнянні з 2020 р. Водночас, зростання завантаженості міжнародних регулярних рейсів українських авіаліній відбулося на 6,2 % і становило 75,2 % [11]. Розвиток міжнародного співробітництва та спільного використання повітряного простору України залучив до українських аеропортів 29 іноземних компаній, які здійснювали регулярні польоти із 34 різних країн світу. Позитивним моментом розвитку міжнародної співпраці є вихід на український авіаційний ринок чотирьох нових авіаційних перевізників Республіки Кіпр Cyprus Airways, перевізник Королівства Саудівська Аравія Flynas, перевізник Федеративної Республіки Німеччина Eurowings та британська авіакомпанія Ryanair UK. Відтак, відбулося збільшення обсягів перевезень іноземними авіалініями на ринку міжнародних регулярних сполучень на 83,4 % та склало 6096,8 пасажирів. Характеризуючи загальний обсяг регулярних перевезень пасажирів між різними країнами світу та Україною доля іноземних компаній досягла 70 %. У 2021 р. активно відкриваються нові маршрути на міжнародних регулярних пасажирських рейсах (23 од.) українськими авіаційними компаніями, а також іноземними авіаційними лініями (23 од.) [11]. Міжнародні перевезення поділяються на два види: регулярні та нерегулярні. У 2021 р. відбулося часткове відновлення регулярних міжнародних перевезень (36,6 %) у порівнянні із 2019 р. Проте, міжнародні нерегулярні перевезення українських авіаліній відновилися на 100 % і показали позитивну динаміку до подальшого зростання. Завдяки нерегулярним авіаційним перевезенням було обслуговувано 6013,4 тис. пасажирів від 13 авіакомпаній або на 10,9 % більше від 2019 р., який не мав протиепідемічних обмежень. Внутрішні регульовані польоти у межах повітряного простору 12 міст України здійснювали шість авіакомпаній: «Роза вітрів», «Міжнародні авіалінії України», «Мотор-Січ», «Скайап», «Біз Ейрлайн» та «Ейр Оушен Ейрлайнс». У 2021 р. було пере-

Таблиця 2

Авіаційні перевезення в транспортній системі перевезення вантажів за період 2017–2021 рр.

Вид транспорту	2017 р.		2018 р.		2019 р.		2020 р.		2021 р.	
	млн т	%	млн т	%	млн т	%	млн т	%	млн т	%
залізничний	339	21,42	322	19,5	313	19,81	306	18,64	314	20,68
автомобільний	1122	70,92	1206	73,4	1147	72,64	1232	75,07	1121	73,84
водний	6	0,38	6	0,37	6	0,38	6	0,37	5	0,33
авіаційний	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01	0,1	0,01
трубопровідний	115	7,27	109	6,63	113	7,16	97	5,91	78	5,14
Всього	1582,1	100	1643,1	99,91	1579,1	100	1641,1	100	1518,1	100

*Розраховано авторами на основі [10].

везено 713,8 тис. пасажирів внутрішніми регулярними рейсами, а коефіцієнт зайнятості пасажирських крісел становив 70,7 % або на 8,1 % більше ніж з попереднім роком [11]. До 2015 р. відбувається спад авіаційних перевезень, а у 2016–2019 р. спостерігається значне зростання авіаційних перевезень пасажирів, у 2020 р. – спад, спричинений пандемією, а у 2021 р. – показано зростання, що повідомляє про відновлення діяльності з авіаційних перевезень пасажирів у зв'язку з зняттям протіепідемічних обмежень між різними країнами (табл. 3).

Таблиця 3

Характеристика обсягів перевезень пасажирів авіаційним транспортом, тис. чол.

Рік	Обсяг перевезень авіаційним транспортом				
	Внутрішні		Міжнародні		Всього
2012	1285,4	16	6820,9	84	8106,3
2013	1210,1	15	6900,3	85	8110,4
2014	646,6	10	5828,6	90	6475,2
2015	624,7	10	5679,6	90	6304,3
2016	802,5	10	7475,3	90	8277,8
2017	941,4	9	9614,9	91	10556,3
2018	1082,9	9	11450,5	91	12533,4
2019	1158,6	8	12547,1	92	13705,7
2020	509,8	11	4287,7	89	4797,5
2021	725,8	8	8622,3	92	9348,1
2021/2012	56	50	126	110	115

Джерело: розраховано авторами на основі [11].

Транспортна галузь національної економіки потребує новітніх сучасних принципів щодо створення ефективної державної політики. Негативні наслідки для конкурентоспроможності й ефективного функціонування національної економіки має диспропорція у організації обсягів пасажирських та вантажних перевезень. Основними причинами є низький попит на авіаційні послуги потенційних платоспроможних клієнтів, слабка конкуренція авіаційного транспорту на ринку транспорт-

них послуг, і, як наслідок, авіаційний транспорт у 245 разів менше перевозить пасажирів, ніж автомобільний [12].

Головною задачею державної транспортної політики стає досягнення рівня транзитної держави шляхом організації ефективної системи клієнтоорієнтовного обслуговування, підвищення ефективності функціонування транспортно-дорожнього комплексу держави, розвиток партнерських відносин та конкурентних засад при здійсненні перевезень усіма видами транспорту.

Сталий розвиток авіаційних перевезень можливий при дотриманні таких умов: зменшення обмежень при виконанні польотів між різними країнами світу та нашою державою стосовно кількості залучених авіапідприємств, пунктів та частот; укладання Угоди про спільний авіаційний простір з Європейським Союзом; членство у складі Ради Міжнародної організації цивільної авіації (ІКАО), впровадження стандартів ІКАО у повітряний простір України, оновлення аеронавігаційної системи шляхом організації інфраструктури навігації, спостереження, зв'язку повітряного руху, організація вільних маршрутів у повітряному просторі (FRAU) та навігаційних технологій на основі GNSS; впровадження терміналів для обслуговування пасажирів та вантажів на базі мультимодальних технологій із міжнародними стандартами якості обслуговування; формування із міжнародного аеропорту «Бориспіль» провідного вузла Східної Європи шляхом розширення мережі авіаційних сполучень, залучення більшої кількості авіаперевізників; дерегуляція економічної діяльності регіональних аеропортів з пасажиропотоком до 5 млн. пасажирів у частині справляння аеропортових зборів відповідно до законодавства ЄС; реконструкція злітно-посадкових смуг та комплексна модернізація обладнання в регіональних аеропортах для можливості експлуатації середньомагістральних літаків, а за доцільності і широкофюзеляжних літаків

відповідно до законодавства ЄС; створення системи кібернетичної безпеки цивільної авіації з урахуванням стандартів та рекомендованої практики ІКАО та законодавства ЄС; підвищення ефективності діяльності Національного бюро з розслідування авіаційних подій та інцидентів з цивільними повітряними суднами відповідно до законодавства ЄС для прийняття неупередженого рішення щодо інцидентів або актів незаконного втручання; запровадження комплексного підходу до врегулювання діяльності аеропортів як цілісних майнових комплексів на законодавчому рівні, враховуючи технологічні особливості та міжнародні вимоги до інфраструктури, запровадження сучасних підходів до економічного регулювання діяльності аеропортів усіх форм власності [12].

За період 2017–2022 рр. фінансовий результат (сальдо) до оподаткування підприємств авіаційного транспорту має від’ємне значення, і лише у 2021 р. сальдо мало позитивне значення. У 2022 р. половина підприємств авіаційного транспорту отримала прибуток (1726,2 млн грн), а друга половина – збиток (10172,2 млн грн), який перебільшує прибуток на 8446 млн грн (табл. 4).

За період 2017–2022 рр. підприємства авіаційного транспорту одержали збиток, лише у 2021 р.

прибуток склав 815,9 млн грн, що показало значні темпи відновлення авіаційної галузі після пандемії. Рентабельність авіаційних підприємств не має постійності та стійкості. Подібна ситуація пояснюється наявністю сукупності проблемних питань, які негативно впливають на функціонування та розбудову авіаційних підприємств. Позитивна тенденція спостерігається у 2021 р. щодо рівня рентабельності від операційної діяльності – 2,2 %, а від усієї діяльності – 1,9 % (табл. 5).

Авіаційний транспорт є засобом обслуговування у рамках господарського комплексу країни. Ефективне функціонування підприємств багатьох інших галузей національної економіки напряму залежить від якісного обслуговування та своєчасної доставки пасажирів та вантажів. Одним із важливих факторів впливу на роботу авіаційного підприємства є досягнення достатнього рівня у сфері економічної безпеки. На даний час існує чимало дестабілізуючих чинників внутрішнього та зовнішнього характеру, які негативно впливають на розвиток та функціонування авіаційних підприємств. Наявність цілої низки недоліків у нормативно-правових актах законодавчої бази України, непомірне оподаткування, високі розцінки на ресурсне забезпечення створюють значні пере-

Таблиця 4

Фінансові результати до оподаткування підприємств авіаційного транспорту за період 2017–2022 рр.

Рік	Фінансовий результат (сальдо) до оподаткування, млн грн	Підприємства, які одержали			
		Кількість підприємств, %	Прибуток, млн грн	Кількість підприємств, %	Збиток, млн грн
2017	-961,2	55,4	388,5	44,6	1349,7
2018	-1421,4	68,5	1776,2	31,5	3197,6
2019	к/с	к/с	к/с	к/с	к/с
2020	к/с	к/с	к/с	к/с	к/с
2021	1087,5	65,8	2078,4	34,2	990,9
2022	-8446	50,0	1726,2	50,0	10172,2
2022/2017	879	90	444	112	754

Джерело: розраховано авторами на основі [10].

Таблиця 5

Чистий прибуток (збиток) та рентабельність підприємств авіаційного транспорту за період 2017–2022 рр.

Рік	Чистий прибуток (збиток), млн грн	Підприємства, які одержали				Рівень рентабельності підприємств, %	
		Кількість підприємств, %	Прибуток, млн грн	Кількість підприємств, %	Збиток, млн грн	операційної діяльності	усієї діяльності
2017	-959,3	55,4	401,5	44,6	1360,8	-4,8	-2,2
2018	-1722,8	68,5	1474,9	31,5	3197,7	-2,6	-3,1
2019	к/с	к/с	к/с	к/с	к/с	к/с	к/с
2020	к/с	к/с	к/с	к/с	к/с	к/с	к/с
2021	815,9	65,8	1819,4	34,2	1003,5	2,2	1,9
2022	-8624,7	50,0	1430,1	50,0	10054,8	-4,8	-26,3
2022/2017	899	90	356	112	739	100	1195,5

Джерело: розраховано авторами на основі [10].

шкоди щодо інвестиційної привабливості цього сектору, його розповсюдженню, сталому розвитку та економічному зростанню. Вирішенню гострих проблем авіаційних підприємств потребує: впровадження кращого світового досвіду для розвитку авіаційної галузі; підвищення якісних показників обслуговування пасажирів та доставки вантажів; розвиток зовнішньоекономічних та регіональних зв'язків та моделей мультимодальних перевезень; удосконалення державного управління авіаційної галузі; доступність процесу присвоєння статусу міжнародного аеропорту іншим регіональним аеропортам країни; залучення інвестицій та державної підтримки для розвитку авіаційних підприємств; запровадження ефективного механізму оподаткування з метою приваблення приватних капіталовкладень; зниження тарифів на авіаційні послуги підприємств цивільної авіації та збільшення конкурентоздатності на глобальному ринку авіаційних перевезень; розробка нормативно-правової бази стосовно належності та застосування безпілотних літальних апаратів.

Висновки. Таким чином, авіаційна галузь як складова частина транспортного комплексу Укра-

їни вимагає корінних структурних змін та оновлення матеріально-технічної бази, впровадження новітніх технологій перевезення організації авіаційних перевезень, впровадження найкращого світового досвіду щодо надання якісного обслуговування пасажирів та доставки вантажів згідно із сучасними потребами ринкової економіки, європейських та світових норм і стандартів якості. Ліквідація ключового аспекту критичного становища авіаційної галузі України та досягнення її сталого розвитку із залученням інноваційно-інвестиційних заходів потребує впровадження державної підтримки та розвитку приватно-партнерських відносин. Авіаційна галузь України володіє високим потенціалом через зручне географічне місцезнаходження. На одержання прибутку впливають вартість енергетичних ресурсів, валютний ринок, тарифний план та обсяг міжнародних перевезень. Перспективами для подальших досліджень є підвищення рівня економічної безпеки та збільшення державного фінансування авіаційної галузі в транспортній системі України з метою стабілізації функціонування господарського комплексу держави.

Список літератури:

1. Цебенко Н. М. Фінансові ресурси оновлення транспортної інфраструктури України. Наукові записки. 1 (54), 2017. С. 82–98.
2. Чупрін Є. С., Кондратенко Д. В., Гелеверя Є. М. Аналіз та перспективи розвитку транспортної галузі України з позиції автотранспортних підприємств. Науковий вісник Ужгородського національного університету. Випуск 24(3), 2019. С. 125–130.
3. Хрущ Н. А. Фінансово-аналітична діагностика діяльності підприємств автомобільного транспорту України. Економіка та суспільство. Випуск 15, 2018. С. 494–501.
4. Гурнак В. М., Хоменко І. О., Волинець Л. М. Пріоритетні напрямки підвищення фінансової стійкості підприємств транспортної інфраструктури України. Фінансові дослідження. № 1(4), 2018. С. 1–9.
5. Бойко О. В., Двудліт З. П. Сталий розвиток транспортної системи України. Науковий вісник НЛТУ України. Випуск 23.18, 2013. С. 94–103.
6. Дикань В. Л., Корінь М. В. Ефективність роботи транспортної системи в умовах глобалізації економічних систем. Вісник економіки і промисловості. № 33, 2011. С. 13–19.
7. Крихтіна Ю. О. Державна політика розвитку транспортної галузі України. Теорія, методологія, практика: монографія. Харків: «Діса плюс», 2022. 336 с.
8. Овсак О. П., Ліскович Н. Ю. Макроекономічні аспекти впливу розвитку повітряного транспорту на економіку України. Причорноморські економічні студії. 48(1). 2019. С. 133–141.
9. Фризоренко А. Зовнішня торгівля України. Статистичний збірник Державна служба статистики України. 102 с. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/publ10_u.htm (дата звернення: 25.10.2023)
10. Вишневська О. Транспорт України за 2022 р. Статистичний збірник. Державна служба статистики України. 98 с. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 25.10.2023)
11. Підсумки діяльності авіаційної галузі України за 2021 рік. Статистична інформація. Державна авіаційна служба. 4 с.
12. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018>

**Harazha O.P., Shevchuk D.O., Havryliuk S.O. ECONOMIC ACTIVITY
OF THE AVIATION INDUSTRY OF UKRAINE: ANALYSIS AND CHALLENGES**

The economic activity of the aviation industry ensures national interests regarding the effective functioning of the transport infrastructure of the economic complex, the sustainable development of the national economy, the aviation industry contributes to the development of export-import and transit transportation of goods and passengers. It was found that the modern aviation industry contributes to the elimination of the main needs of passengers and cargo for various sectors of the economy in terms of volume, but the quality does not meet world standards. It was found that the competitiveness and efficiency of the aviation industry, regulatory and legal support and development of private-state partnership, attraction of private investments are necessary principles for the sustainable development of the aviation industry and its economic capacity in the world market of air transportation organization. It has been proven that in order to create strong national security and socio-economic development of the country, it is necessary to modernize the material and technical base of aviation enterprises, state financial support, and perfect technical and technological maintenance of the transport infrastructure. It has been analysed that the efficiency of the aviation industry is affected by the mass containerization of air transportation, interoperability with other systems in a continuous chain of cargo delivery, globalization processes of the organization of transcontinental air transportation, and the reduction of prices for air transportation for interregional transport connections. It was revealed that the aviation industry as a component of the transport complex of Ukraine requires fundamental structural changes and updating the material and technical base, the introduction of the latest transportation technologies of the organization of air transportation, the implementation of the best world experience in providing high-quality passenger service and cargo delivery in accordance with the modern needs of the market economy, European and world norms and quality standards. It was established that the elimination of the key aspect of the critical situation of the aviation industry of Ukraine and the achievement of its sustainable development with the involvement of innovation and investment measures requires the implementation of state support and the development of private-partnership relations.

Key words: aviation, strategy, finance, economy, enterprise, import, export, profitability.

Доля К.В.

Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Доля О.Є.

Харківський національний університет радіоелектроніки

КОМПЛЕКСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ МАРШРУТІВ

Транспорт є важливим елементом функціонування суспільства та його економічного стану. Транспорт забезпечує потреби людства у перевезенні людей та вантажів. Потoki пасажирів і вантажів формуються при одночасному урахуванні складності, вартості, часу та швидкості їздки. Визначення закономірностей в системі перевезень пасажирів є важливим завданням для досліджень сучасних науковців. Дослідження потоків в системі пасажирських перевезень є таким завданням і викликає зацікавленість. Перерозподіл пасажирів між маршрутами одного транспорту та її перерозподіл пасажирів між видами транспорту призводить до зміни показників перевезень. Кількість пасажирів перевезених певним маршрутом впливає на інтервал руху, пасажиромісткість, вартість рухомого складу та всі інші технічні та фінансові параметри перевезень. Дослідження сталих пасажирських кореспонденцій між містами, розподіл таких кореспонденцій між альтернативними маршрутами серед маршрутів одного та маршрутами різних видів транспорту є важливим питанням сучасності. Запропоновано запровадити комп'ютерне моделювання формування пасажиропотоків в межах території України. У проведеному дослідженні запропоновано функцію привабливості маршруту, яка на відміну від існуючих враховує час їздки до станції, класність станції (рівень обслуговування на станції), час посадки, інтервал руху засобів транспорту на маршруті, комфортність засобів транспорту, комфортність їздки, вартість їздки, швидкість їздки між станціями, час висадки та час їздки від станції. Визначено, що параметри роботи окремих підсистем (елементів) маршрутних систем транспорту є пов'язаними між собою.

Ключові слова: мережа маршрутів, період окупності, чистий прибуток, пасажир, засіб транспорту, перевезення.

Постановка проблеми. Сучасний стан проблеми полягає в розрахунках параметрів роботи маршруту без урахування його системного функціонування в повній мірі. Попередниками викладено дослідження не в повній мірі враховують й залежність певних результатів роботи маршруту в мережі від інших зовнішніх чи внутрішніх факторів. Такі впливи мають прямий або безпосередній вплив на результати функціонування маршруту. Недостатність вивчення даного питання в системному підході із використанням моделювань і є проблемою сучасної наукової думки в питаннях розвитку та планування роботи транспортних систем при пасажирських перевезеннях на маршрутах загального користування.

Цілю роботи є визначення можливості системного розрахунку параметрів функціонування маршруту загально користування.

Практична значущість. Отримано модель, якою можна прогнозувати та здійснювати заходи планування розвитку проектів із закупівлі засобів транспорту. Отримано модель для визначення стану проекту та його параметрів від зовнішніх й внутрішніх факторів із урахуванням системності

функціонування мереж маршрутів пасажирського транспорту на одній території. Запропонований підхід можна застосовувати до різних регіонів за територіальним охопленням. В роботі отримано результати при спиранні на методи такі як: емпіричний при спостереженні за діючою системою, вивченні системи, вимірюванні її параметрів, комплексний при аналізі літератури, моделюванні мережі, верифікації при аналізі отриманих результатів, первинні методи при вивченні джерел та математичний при отриманні функції.

Аналіз останніх досліджень обсягів перевезень пасажирів. Сучасними науковими [1–8] дослідженнями вивчались питання привабливості маршрутів загального користування.

Часто науковці [9–15] в своїх дослідженнях оглядають один маршрут, або маршрут підвезення пасажирів до певних точок концентрації пасажирів. В даній роботі ми прийmemo такі точки, як і всі інші зупинки, в якості вузлів для моделювання маршрутної мережі. Дослідниками [16–20] до певних точок додано їхню привабливість через коефіцієнт чи в інший спосіб.

Науковцями не в повній мірі визначено мережний вплив маршруту на мережу [17–20], не достатньо встановлено вплив параметрів функціонування маршруту на параметри показників перевезень.

Об'єкт дослідження – процес функціонування пасажирських транспортних систем в межах України.

Предмет дослідження – пасажирські транспортні системи, формування потоків пасажирів, перерозподіл пасажирів між альтернативними маршрутами в одному та багатьох видах транспорту.

Мета статті – визначення параметрів елементів маршрутної системи в моделі маршрутної мережі на прикладі України та їх дослідження. Для отримання поставлених задач в роботі було використано методи наукового дослідження: емпіричний при спостереженні за діючою системою, вивченні системи, вимірюванні її параметрів, комплексний при аналізі літератури, моделюванні мережі, верифікації при аналізі отриманих результатів, первинні методи при вивченні джерел та математичний при отриманні функції.

Виклад основного матеріалу. Висвітлюються основні положення і результати наукового дослідження, особисті ідеї, закономірності, зв'язки, тенденції, опис експерименту, методика отримання та аналіз фактичного матеріалу, особистий внесок автора в досягнення і реалізацію основних висновків тощо. Даний розділ може бути розбитим на підрозділи. Подання заголовку підрозділу здійснюється наступним чином:

Моделювання функціонування залізничної мережі проведено із зміною вартості рухомого складу від 9500000 умовних одиниць до 9050000 умовних одиниць із інтервалом 50 000 умовних одиниць (у.о.).

Моделювання вартості рухомого складу відображає можливості певного регіону до розвитку галузі перевезень пасажирів. Вартість рухомого складу впливає на екологічну складову перевезень, безпекові можливості засобу транспорту, комфортність користування транспортом та інші параметри.

Вартість засобів транспорту впливає на перерозподіл пасажирів у запропонований спосіб перерозподілу потоків в попередніх роботах.

Вартість засобів транспорту впливає не лише на показники привабливості певного транспорту параметрами комфортності їзди, а й впливає на технічні параметри засобів транспорту.

До технічних параметрів можна віднести системи безпеки їздки, швидкісні характеристики,

особливості витрат палива, типи палива та інші параметри.

Зміна параметрів експлуатації засобів транспорту та параметрів комфортності їздки впливає на значення функції перерозподілу пасажирів.

Фактичні параметри функції перерозподілу пасажирів прямопропорційно впливають на дохідну частину фінансового ресурсу проекту із закупівлі засобів транспорту, рух фінансових потоків, в частині їхнього розміру, впливає на фінансові параметри й може призводити до змін дисконтованого чистого прибутку.

Окрім фінансових характеристик перевізників – суб'єктів господарювання, які є учасниками проектів із придбання засобів транспорту на маршрут загального користування є й характеристики регіону перевезень та організації проекту.

На суб'єктів господарювання – перевізників впливає регіон їхнього функціонування. Факторами впливу на проект закупівлі засобів транспорту є:

а) соціально-економічний стан розвитку населення, яким обумовлюється купівельна спроможність пасажирів, кількість пересувань, середня дальність маршрутної їздки, вплив вартості на перерозподіл потоків пасажирів.

б) регіональні (державні) фактори розвитку галузі, до таких параметрів можна віднести:

А. ставку дисконту,

В. відсоткові виплати по запозиченому капіталу,

С. податкове навантаження на фінансові ресурси,

Д. підтримка населення у реалізації потреби в пересуванні засобами впровадження соціального тарифу та в інші способи.

Вище зазначене демонструє вплив вартості на кількість пасажирів, вплив умов запозичення капіталу й інші фактори комплексного (системного) впливу факторів середі функціонування проекту на сам проект й основні параметри його функціонування.

Основними параметрами функціонування засобів транспорту на маршруті загального користування, придбаними суб'єктом господарської діяльності для отримання прибутку можна віднести змінні в часі поквартально:

а) чистий прибуток,

б) дисконтований чистий прибуток,

с) витрати на утримання персоналу,

д) період окупності (T_o).

У випадку функціонування суб'єкта господарської діяльності для виконання функцій отри-

мання прибутку ми можемо віднести зазначені параметри до основних. Маються випадки виконання перевезень для забезпечення потреб населення у переміщенні і тому фінансові параметри не є можливими для визначення доцільності функціонування.

При функціонуванні засобів транспорту для забезпечення соціальних потреб населення на певному маршруті, як правило, фінансові потреби суб'єкта господарювання забезпечуються за рахунок бюджету.

В таблицю 1 зведено відомості про моделювання періоду окупності маршруту 62 залізничної маршрутної мережі.

Середній дохід виражено в умовних одиницях в добу (у.о.*доб.), пасажиропотік – Qt обсяг пасажирів в квартал (пас. кв.)

На рисунку 1 наведено графіки окупності проекту із закупівлі засобів транспорту на маршрут номер 62 залізничної маршрутної мережі,

За даними табл. 1 та рис. 1 можна спостерігати, що період окупності проекту має значні відмінні від кварталу до кварталу значення та залежить від вартості засобів транспорту.

Термін окупності проекту має імовірність настати з 43-го по 112-й квартал. Можна спостерігати найбільші імовірності настання окупності в межах від 0,05 в моделюванні при зменшенні вартості засобів транспорту від 500000 умовних одиниць в кварталі від 56-го до 68-го.

Грошові фінансові потоки при експлуатації різних маршрутів є відмінним й рух чистого прибутку на маршруті номер 62 залізничної маршрутної мережі зведено в таблицю 2.

Таблиця 1

Відомості розрахунків про моделювання періоду окупності в залізничній межі пасажирської транспортної системи України.

№ з/п	Квартал, №	Імовірність окупності, к	Середній дохід, у.о.*доб.	Пасажиропотік, Qt пас. кв.
Маршрут № 62				
1	112	0,0007	252093	4481
2	110	0,00077	252093	4481
3	108	0,00086	252093	4481
4	106	0,00094	252093	4481
5	104	0,00103	252093	4481
6	103	0,00113	4531	0,00113
7	101	0,00125	4541	0,00125
8	100	0,00135	4551	0,00135
9	98	0,00149	4561	0,00149
10	97	0,00161	4571	0,00161
11	96	0,00176	4581	0,00176
12	94	0,00192	4591	0,00192
13	93	0,00207	4601	0,00207
14	92	0,00225	4611	0,00225
15	91	0,00243	4621	0,00243
16	90	0,00262	4631	0,00262
17	89	0,00283	4641	0,00283
18	88	0,00305	4651	0,00305
19	87	0,00327	4661	0,00327
20	86	0,00352	4671	0,00352
21	85	0,00376	4681	0,00376
22	84	0,00402	4691	0,00402
23	83	0,00320	4701	0,00320
24	82	0,00451	4711	0,00451
25	81	0,00480	4721	0,004800
26	80	0,01052	4741	0,01052
27	79	0,00574	4751	0,00574
28	78	0,00607	4761	0,00607
29	77	0,01319	4781	0,01319
30	76	0,00712	4531	0,00712
31	75	0,01335	4541	0,01335
...
60	46	0,01432	252093,33	5571
61	45	0,01240	252093,33	5621
62	44	0,00885	252093,33	5671

На рисунку 2 наведено графіки зміни фінансових потоків чистого прибутку в проектах із закупівлі засобів транспорту на маршрут номер 62 залізничної маршрутної мережі при зміні вартості засобів транспорту. Кожне моделювання включає діапазон можливого настання окупності проекту при зміні вартості засобів транспорту. Імовірно, що проект досягне періоду окупності з 42-го по

113-й квартали, тобто 70 варіантів й так 11 моделювань. В цілому отримано понад 700 варіантів можливого параметру фінансового потоку чистого прибутку. 700 графіків на одному рисунку унеможливають візуальне сприйняття моделювання. На рисунку 2 наведено графіки фінансового потоку чистого прибутку в проектах із закупівлі засобів транспорту на маршрут номер 62 залізничної

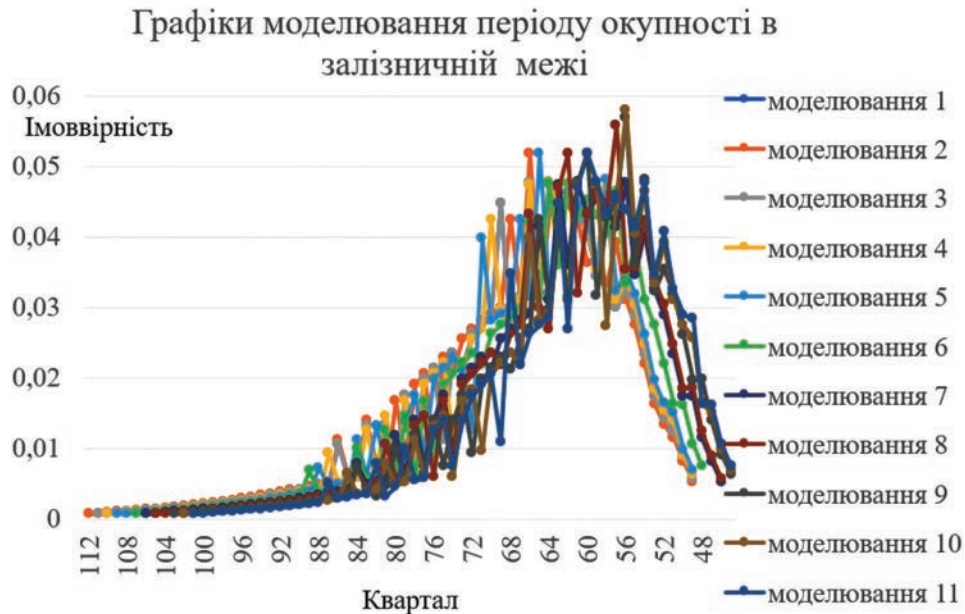


Рис. 1. Графіки окупності проекту із закупівлі засобів транспорту на маршрут номер 62 залізничної маршрутної мережі

Джерело: розроблено авторами.

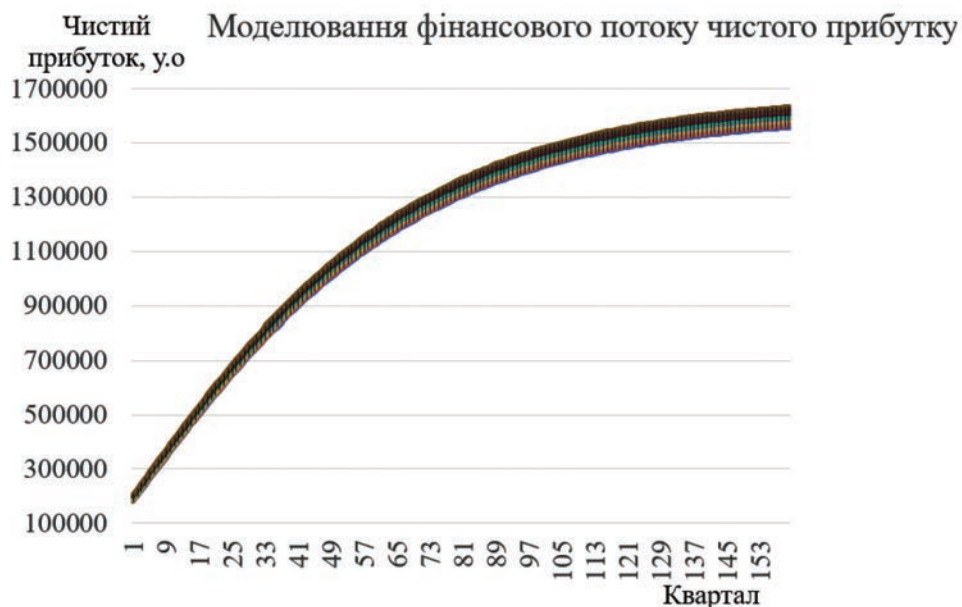


Рис. 2. Графіки зміни фінансових потоків чистого прибутку в проектах із закупівлі засобів транспорту на маршрут номер 62 залізничної маршрутної мережі при зміні вартості засобів транспорту



Рис. 3. графік розподілу чистого прибутку у другому кварталі кожного з моделювань

Таблиця 2
Грошовий фінансовий потік чистого прибутку на маршруті номер 62 залізничної транспортної мережі пасажирських маршрутів

№ кварталу окупності	Розмір грошового потоку чистого прибутку по кварталах, ЧП у.о.			
	1	–	159	160
113	180078,11	–	1557823,24	1558974,9
111	183425,55	–	1566576,77	1567733,2
109	186772,99	–	1575330,29	1576491,5
107	190120,42	–	1584083,81	1585249,8
...
46	524900,78	–	2465930,47	2467571,7
45	538294,29	–	2500973,57	2502634
44	551687,80	–	2536016,67	2537696,2
43	568429,69	–	2579820,54	2581524,1
42	585171,57	–	2623624,41	2625351,9

маршрутної мережі. На рисунку моделювання в умовах вартості засобів транспорту 9350000 у.о., що вплинуло на отримання імовірності окупності проекту з 42-го по 113-й квартал.

На рисунку 2 зображено графіки зміни чистого прибутку з першого по 160-й квартали. Тривалість проекту складає до 160-и кварталів. Проект із окупністю понад 160 кварталів не є актуальним. На рисунку графіки, що відповідають настанню окупності з 98-го по 113-й квартали.

Припустимо, що між фактором чистого потоку й фактором кварталу є кореляційний зв'язок. Для перевірки висунутої теорії було обрано розмір фінансового потоку в другому розрахунковому

кварталі. Згідно із табличними даними окупність проекту розподілиться між 42-м та 113-м кварталами, а розмір чистого прибутку прийме значення від першого до сто шести десятого кварталу. На рисунку 3 наведено графік розподілу чистого прибутку у другому кварталі кожного з моделювань.

Моделювання окупності проектів по закупівлі засобів транспорту було проведено й отримано, що такий проект для 6-го маршруту залізничної мережі окуповується в інтервалі з 42-го по 113-й квартали. Згідно із моделюванням імовірно настання окупності проекту 62-го маршруту залізничної мережі в інтервалі з 42-го по 113-й квартали, тобто на протязі 71-го кварталу. Модель розраховує проекти на залізничному транспорті для 160-и кварталів, тобто період окупності має настати в інтервалі від 1-го до 160-го кварталу. Модель надає відомості про імовірність окупності проекту більшу ніж 0,001, бо менша імовірність не задовільною для урахування.

Згідно із таблицею 11 факт настання окупності проекту настане 71-н раз із імовірністю понад 0,001 в інтервалі від 42-го до 113-го кварталу. За результатами моделювання отримано, що проект імовірно прийме параметри при яких настане період окупності у 71 – варіанті. 71 варіант розвитку подій при яких настає період окупності понад 0,001 й в інтервалі від 1-го до 160-го кварталу наведено в таблиці 11. При цьому кожен з цих 71-го проектів має певний рух фінансових ресурсів поквартально й ми маємо можливість побудови графіка. Винайдемо функцію відгуку чистого прибутку від кварталу настання окупності проекту.

Ймовірні функції зведено в таблицю 3.

Таблиця 3

Імовірні функції відгуку з величинами достовірності їхньої апроксимації

№ квар- талу окуп- ності	Розмір грошового потоку чистого прибутку по кварталах, ЧП у.о.			
	1	...	159	160
113	180078,11	...	1557823,24	1558974,9
111	183425,55	...	1566576,77	1567733,2
109	186772,99	...	1575330,29	1576491,5
107	190120,42	–	1584083,81	1585249,8
...
46	524900,78	–	2465930,47	2467571,7
45	538294,29	–	2500973,57	2502634,0
44	551687,80	–	2536016,67	2537696,2
43	568429,69	–	2579820,54	2581524,1
42	585171,57	–	2623624,41	2625351,9

З даних таблиці 3 можна стверджувати, що можна знайти кореляцію між кварталом окупності та чистим прибутком. Поліноміальна залежність є такою, що має найбільше значення величини достовірної апроксимації.

При цьому не можна стверджувати, що To (час/квартал/рік) безпосередньо впливає на ЧП (у.о.), й не можна стверджувати, що To (час/квартал/рік) є фактором прямого чи зворотного впливу на ЧП (у.о.). Через пасажиропотік (Qt пас. кв.) дохідна частина проекту (D) формується із урахуванням тарифу на перевезення (у.о.*км.) та проектних витрат (C) в часі. Цим можна описати, що ЧП залежить від фактору часу не безпосередньо, а через фактор результату взаємовпливу факторів витрат та доходу в часі. Не можна на даному етапі розвитку науки стверджувати, що на To (час/квартал/рік) безпосередньо впливає ЧП (у.о.). сучасна наука й притика не в повній мірі визначає, що може впливати на To (час/квартал/рік).

Можна припустити, що To (час/квартал/рік) через результати комплексного впливу набору факторів впливає на ЧП (у.о.), який демонструє певні характеристики проектів.

З точки зору запозичення капіталу у сторонніх осіб або з власних ресурсів чистий дисконтований дохід є показником, що демонструє доцільність провадження проекту як і період окупності та інші.

Грошові фінансові потоки дисконтованого чистого прибутку при експлуатації маршрутів залежить від ставки дисконту. Маршрут 62 залізничної мережі має достатню імовірність окупності в 42-му 113-му кварталах. Таким чином

мається 71 проект розвитку проекту при якому настає окупність проекту. Для кожного проекту розраховано поквартально й дисконтований чистий прибуток. Всього проект із закупівлі засобів транспорту розраховується на 160 кварталів.

Ресурси життєвого циклу проекту на залізничному транспорті із закупівлі засобів транспорту обмежені технічним станом самих засобів транспорту. Вік засобів транспорту понад 160 кварталів призводить до їхнього зношення часом та пробігом. Рух фінансового ресурсу – дисконтованого чистого доходу наведено в таблиці 4.

Таблиця 4

Грошовий фінансовий потік дисконтованого чистого прибутку на маршруті номер 62 залізничної транспортної мережі пасажирських маршрутів

№ кварталу окупності	Розмір грошового потоку дисконтованого чистого прибутку по кварталах, ДЧП у.о.			
	1	...	159	160
113	180078,1	...	37861,99	37889,98
111	183425,5	...	38074,74	38102,84
109	186772,9	...	38287,49	38315,71
107	190120,4	...	38500,23	38528,58
...
46	524900,7	...	59777,50	59817,48
45	538294,2	...	60628,74	60669,18
44	551687,8	...	61479,98	61520,88
43	568429,6	...	62544,02	62585,51
42	585171,5	...	63608,07	63650,14

Чистий дисконтований прибуток розраховано із урахування, що розмір ставки дисконту дорівнює 0,1.

На рисунку 4 наведено графік ДЧП у другому кварталі проектів при досягненні періоду окупності.

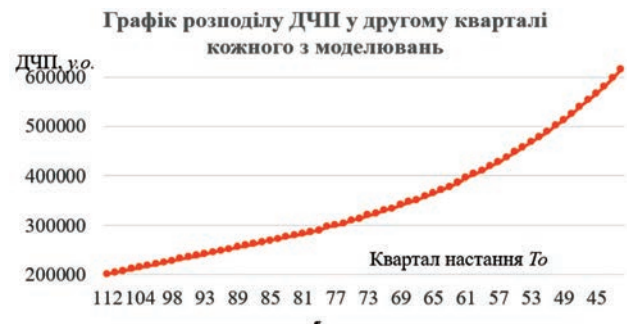


Рис. 4. Графік ДЧП у другому кварталі проектів при досягненні періоду окупності

На рисунку 4 наведено графіки зміни ДЧП у другому кварталі проектів окупності витрат на придбання засобів транспорту на маршрут номер 62 залізничної маршрутно мережі, який, імовірно, також має кореляцію між факторами. В таблицю 5 зведено функції відгуку з величинами достовірності їхньої апроксимації ДЧП від T_0 .

Таблиця 5

Імовірні функції відгуку з величинами достовірності їхньої апроксимації

Тип функції	Функція	Величина апроксимації, R^2
Експоненціальна	$y' = 190184e^{0,0169x}$	0,9844
Лінійна	$y' = 5914,9x + 154061$	0,9353
Логарифмічна	$y' = 100823\ln(x) + 23081$	0,6416
Поліноміальна	$y' = 90,081x^2 + 59,653x + 218469$	0,9945
Ступенева	$y' = 124264x^{0,304}$	0,7695

де x – квартал окупності проекту, T_0 (год./квартал/рік);
 y – чистий прибуток, ЧП (у.о.).

Величина достовірної апроксимації (R^2) в поліноміальній фікції є кращою за інші значення величини достовірності апроксимації. Можна зробити висновок про наявність поліноміального зв'язку між факторами ДЧП та T_0 . Однак, фактори не можуть впливати один на одного безпосередньо і тому фізичний сенс у даній залежності відсутній.

В таблицю 6 введено відомості про грошовий фінансовий потік витрат на утримання персоналу на маршруті номер 62 залізничної транспортної мережі пасажирських маршрутів.

Таблиця 6

Грошовий фінансовий потік витрат на утримання персоналу на маршруті номер 62 залізничної транспортної мережі пасажирських маршрутів

№ кварталу окупності	Розмір грошового потоку дисконтованого чистого прибутку по кварталах, ДЧП у.о.		
	1	...	160
113	615828,46	...	1727741,61
112	631044,97	...	1737473,06
111	646261,49	...	1747204,52
109	665282,13	...	1756935,97
107	684302,77	...	1766667,43
...
46	584456,01	...	2739922,75
45	599337,69	...	2778859,52
44	614219,36	...	2817796,29
43	632821,46	...	2866467,26
42	651423,56	...	2915138,23

Встановлено, що в проектах з довшим терміном окупності менші витрати на утримання персоналу й навпаки. Витрати на утримання персоналу C_n , імовірно має кореляцію з T_0 , можливість наявності такої кореляції ми перевіримо.

Висновки. Доведено, що між елементами маршрутно мережі існують взаємозалежності. З отриманих графічних відображень розподілу фінансових потоків отримано математичні моделі розрахунку фінансових параметрів проекту від кварталу функціонування такого проекту.

За результатами дослідження доведено, що певні кількісні значення мережі є такими, що підлягають прогнозуванню їхньої кількісної величини та мають ознаки розподілу в часі відповідно до математичних законів.

Список літератури:

1. Dolya, C. Modeling of passenger transport correspondence between regional centers in Ukraine. *Technology Audit and Production Reserves*. 2017. 1(2(33)), 44–48. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.93458>.
2. Dolya K. V. Gravity Model Formalization for Parameter Calculation of Intercity Passenger Transport Correspondence. *SCIENCE & TECHNIQUE*. 2017. Т. 16, №. 5. Р. 437–443.
3. Dolia K., Davidich Y., Dolia O., Lyfenko S., Uhodnikova O. Modeling of polygons of maximum passenger route transport accessibility by the example of the transport system of Ukraine. *Technology Audit and Production Reserves*. 2017. 6(2(38)), 28–33. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.115219>
4. Боцман А. Визначення гравітаційної моделі та її параметрів для прогнозування кількості відвідувачів торговельних об'єктів на прикладі міста Харків / Анастасія Боцман, Костянтин Доля, Олена Доля, Сергій Лифенко // *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. 2018. N 1 (81). С. 96–102. DOI: 10.26642/tn – 2018 – 1 (81) – 96–102.
5. Dolya K. Management of Freight Transport Projects in Cities in Assessing Their Effectiveness / K. Dolya, A. Botsman, O. Dolia, S. Lyfenko // *Software Engineering*. 2016. Vol. 6, No. 2. Р. 63–68. DOI: 10.11648/j.se.20180602.15
6. Доля К. Дослідження закономірностей функціонування системи міжміських пасажирських перевезень / К. Доля, О. Доля // *Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020. N 2 31(70). С. 85–90.

7. Доля О., Доля К. Імітаційне моделювання параметрів функціонування проектів залізничних перевезень. *Комунальне господарство міст*. 2020. №. 1(154). С. 133–137.
8. Aparicio A. Exploring Recent Long – distance Passenger Travel Trends in Europe. *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 14. P. 3199–3208.
9. Markus F. Functional Structuring of Road Networks. *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 25. P. 568–581.
10. Mandir E. Potential of Traffic Information to Optimize Route and Departure Time Choice: dissertation / Mandir Eileen. Stuttgart, 2012. URL: <https://d-nb.info/102687744X/34>
11. Aparicio A. Exploring the Sustainability Challenges of Long – distance Passenger Trends in Europe. *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 13. P. 90–99.
12. Investigations on the distribution of air transport traffic and CO2 emissions within the European Union / Alonso G., Benito A., Lonza L., Kousoulidou M. // *Journal of Air Transport Management*. 2014. Vol. 36. P. 85–93.
13. Hasiak S. Questioning the Relevance of Regional Bus and Train for Low Traffic Flow through a Sustainable Approach / Hasiak S., Rabaud M. // *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 14. P. 1287–1295.
14. Tuaycharoen N. Bangkok Bus Route Planning API / Tuaycharoen N., Sakcharoen A. // *Procedia Computer Science*. 2016. Vol. 86. P. 441–444.
15. Fornalchuk Y. The model of corespondence of passenger transportation on the basis of fuzzy logic / Y. Fornalchuk, A. Bilous, I. Demchuk // *ECONTECHMOD: an international quarterly journal on economics of technology and modelling processes*. 2015. Vol. 4. P. 59–64.
16. Horbachov P. New Conception of Modeling Needs of the Population in Commuting. *Dnipropetrovsk national university Bulletin*. 2009. Vol. 27. P. 210–214.
17. Grosche T. Gravity models for airline passenger volume estimation / T. Grosche, F. Rothlauf, A. Heinzl. // *Journal of Air Transport Management*. 2007. № 13. P. 175–183.
18. Rwakarehe E. Development of a Freight Demand Model for the Province of Alberta Using Public Sources of Data / E. Rwakarehe, M. Zhong, J. Christie // *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2014. Vol. 138. P. 695–705.
19. Two-dimensionally constrained disaggregate trip generation, distribution and mode choice model: Theory and application for a Swiss national model / [M. Vrtic, P. Fröhlich, N. Schüssler et al.] // *Transportation Research Part A Policy and Practice*. 2007. Vol. 41, №. 9. P. 857–873.
20. Bierlaire M. BIOGEME: a freepackage for the estimation of discrete choice models / M. Bierlaire // Paper presented at the 3rd Swiss Transport Research Conference, Ascona, Switzerland, March 19–21. Ascona, 2003. URL: <https://infoscience.epfl.ch/record/117133>

Dolia K.V., Dolia O.Ye. COMPLEX MODELING OF THE ROUTE FUNCTIONING

Transport is an important element of the functioning of society and its economic condition. The problem of researching transportation systems is the cost of such research. It is impossible to conduct an experiment to study changes in passenger flows on routes when the cost of traveling on the route itself or on competitors' routes changes, because such experiments will have their own monetary impact on society and on transport enterprises. It is also difficult to conduct experiments on the state of the system when changing rolling stock, which is also very expensive given the existing scientific interest. A significant cost for the financial burden on transport enterprises or societies can significantly affect the financial flows of the manufacturer or society, and therefore such experiments and conclusions from experiments are not fully conducted, which can lead to uncertainty of actions at certain stages of the project development for the operation of a vehicle on the route. To prevent the occurrence of uncertainties, scientists have proposed modeling certain processes of the route operation. The disadvantages of this approach are that its actual implementation is limited to simulating a certain set of factors. As a result, the obtained models largely consider one route and the impact of one or two factors on it. The proposed model of the transport route network takes into account the interconnectedness of the simultaneous operation of many types of transport and their routes in the network. For the first time, an integrated approach to the study of transport processes is proposed, taking into account the dependence of economic indicators on technical ones and vice versa. The modeling of the route network of the entire region of Ukraine with simultaneous operation of water, air, road and rail transport is carried out.

Key words: route network, payback period, net profit, passenger, means of transit, transportation.

УДК 656.61:656.073.41

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/28>**Коскіна Ю.О.**

Одеський національний морський університет

Решетков Д.М.

Одеський національний морський університет

Тихонін В.І.

Одеський національний морський університет

ВАНТАЖОПОТОКИ ЕКСПОРТНИХ СУХИХ МАСОВИХ ВАНТАЖІВ У ПОРТАХ УКРАЇНИ

Статтю присвячено огляду вантажопотоків сухих масових вантажів в українських портах за період 2017–2021 рр., до моменту повномасштабного вторгнення РФ, яке суттєво змінило виробничу діяльність портових терміналів, унеможлививши перевалку вантажів. Вантажі, які у світовій статистиці відносяться до сухих масових вантажів – зерно, руда, вугілля, добрива – становили вагому частку вантажообігу вітчизняних портів, маючи частку майже у 90% усіх вантажів, які оброблюються в портах України. У певному сенсі це відповідає структурі зовнішньої торгівлі нашої країни, експортна складова якої у великому ступені сформована товарами сировинного походження, які у транспортній сфері відносяться саме до сухих масових вантажів. Структура вантажопотоків сухих масових вантажів є практично незмінною протягом останніх років. Основним вантажем українських портів є зернова продукція – основа вітчизняного експорту. Портові потужності України з перевалки зерна, відповідно, розвинуті на високому технічному і технологічному рівнях. У статті подано обсяги перевалки зерна на експорт та визначено основні зернові порти нашої країни. Друге місце посідають товари та сировина гірничо-добувної промисловості – руди та чорні метали. За певного зменшення частки чорних металів, що обумовлено військовими діями з 2014 р. на Донбасі, де зосереджено основні підприємства металургійного комплексу, частка руд у вантажообігу українських портів демонструє тенденцію певного росту. Основним «рудним» портом нашої країни є Південний, у той час як перевалкою металу, завдяки відносній технологічній та технічній універсальності, опікуються багато українських портів. Добрива, вироблені в Україні, здебільшого надходили до внутрішніх споживачів – аграріїв, то на експорт ніколи не відвантажувались у значних обсягах. На зменшення обсягів відвантаження на експорт добрив останніми роками повлияла і війна на Донбасі – аналогічно до підприємств чорної металургії, значні потужності хімічної промисловості розташовані саме там. Основним портом з експорту добрив є порт Південний.

Ключові слова: сухі масові вантажі, вантажопотоки, морський транспорт, порти України.

Постановка проблеми. Робота портів є невід’ємною частиною забезпечення ефективності функціонування морського транспорту, з одного боку, та транспортного обслуговування вантажопотоків світової торгівлі – з іншого. До 90% вантажопотоків зовнішньоторговельних товарів транспортуються до країн призначення саме із використанням інфраструктури морського транспорту [1] – морськими суднами із відповідними завантаженням та розвантаженням у морських портах. Морський транспорт завжди відігравав значну роль у транспортному забезпеченні зовнішньоторговельних поставок України, враховуючи географічне розташування та наявність виходу до двох морів – Чорного та Азовського. На відміну від торговельного флоту, сучасний стан якого порів-

няно із періодом набуття Україною незалежності, оцінюється як кризовий [2], що наразі підтверджується і статистичними даними [3], вітчизняна портова галузь знаходиться у набагато кращій ситуації, забезпечуючи, зокрема, значну частку транспортування експортних вантажів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Загальні відомості щодо українських портів подані на офіційному сайті Адміністрації морських портів України (АМПУ) – державного підприємства, створеного для управління державним майном в морських портах країни і забезпечення його ефективного використання, враховуючи питання залучення інвестицій, розвитку та стабільної роботи портового бізнесу [4]. Втім, як офіційний орган управління портів, який координує

їх діяльність, створюючи при цьому умови їх конкурентоспроможності, АМПУ є джерелом лише «сухих» статистичних даних по окремих портах, не надаючи узагальненої систематизованої оцінки структурі та динаміці їх вантажообігу, а фіксуючи увагу лише на окремих показниках їх діяльності та перспективних напрямках розвитку.

Морський порт є складною гідротехнічною спорудою, суб'єктом торговельно-транспортних операцій, основне призначення якого полягає у наданні послуг вантажам (вантажовласникам) та суднам (перевізникам). Ключовий об'єктом при цьому є вантаж – саме послуги з перевалки вантажів є основними послугами, які надають перевантажувальні термінали, розташовані у морських портах. Враховуючи значну роль морських портів для забезпечення транспортного обслуговування вантажопотоків, насамперед – зовнішньої торгівлі, різні аспекти діяльності морських торговельних портів привертають увагу фахівців-вчених, які опікуються комерційною роботою морського транспорту та його інфраструктурних елементів. Питання адміністрування та державного управління портами розглянуті зокрема у [5–8]; на забезпеченні та підвищенні конкурентоспроможності портів акцентовано у [9, 10]; як складова морегосподарського комплексу портова інфраструктура проаналізована у [11, 12], а загальний еволюційний розвиток портів у просторовому та функціональному аспектах подано у [13]. Наразі морські порти як елементи транспортної інфраструктури у контексті транспортного забезпечення вантажопотоків залишились поза уваги сучасних акторів – відомі дослідження вже втратили актуальність з огляду на сплин часу [14] або зосереджені на впливі окремих проблем на основну виробничу діяльність портів [15] або акцентують увагу на окремих вантажопотоках [16–18].

Мета статті – надати огляд вантажообігу морських торговельних портів у контексті їх ролі у транспортному забезпеченні зовнішньоторговельних поставок, зокрема – експорту вантажів зовнішньої торгівлі України.

Виклад основного матеріалу. Сировинні товари сягають майже половину усього обсягу експортних поставок – на рис. 1 подано структуру вітчизняного експорту за результатами 2021 р. Саме тому не викликає здивування той факт, що і завантаження вітчизняних портів у великому ступені сформовано саме тими вантажами, сировинними товарами, які формують основу українського експорту.

Такі вантажі у світовій морській торгівлі відносяться до сухих масових вантажів – dry bulk commodities [19]. Саме на ці вантажі перепадає лівова частка українського загальнопортового вантажообороту (рис. 2, табл. 1), яка до того ж характеризується тенденцією зростання: якщо у період 2017–2019 рр. названі вантажі забезпечували $\frac{3}{4}$ вантажообороту вітчизняних портів за експортом, то наступними двома роками така їх частка майже сягнула 80%.

Таблиця 1

Структура експортних вантажопотоків в українських портах, %

Рік	зерно	руди	метал	вугілля та кокс	добрива
2017	40,1	19,8	14,3	0,06	0,52
2018	40,2	18,4	15,2	0,07	0,43
2019	43,7	20,92	11,7	-	0,71
2020	38,15	27,8	12,22	-	1,26
2021	40,5	25,0	13,0	0,11	0,9

Загальні фізичні обсяги перевалки основних вантажів останніми роками перевищують 100 млн. т – і така тенденція спостерігається тривалий період часу, дублюючи наразі відповідні стабільні тенденції зовнішньої торгівлі України.

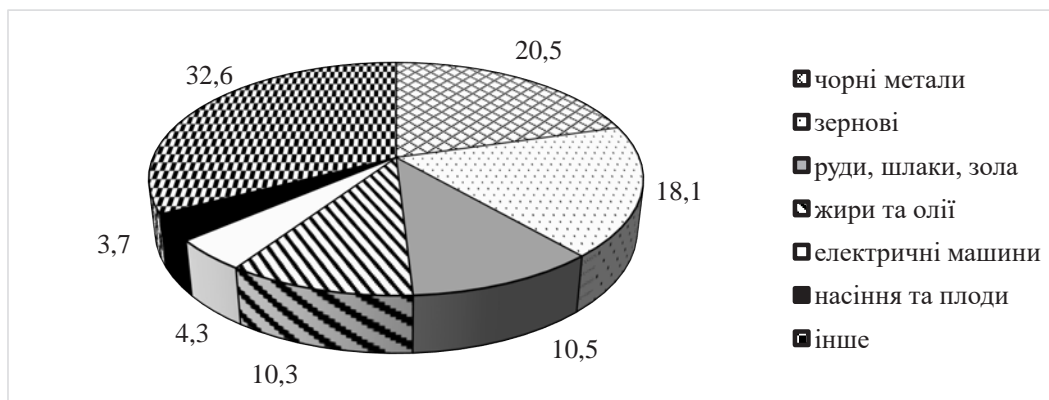


Рис. 1. Структура українського експорту (за даними 2021 р.), %

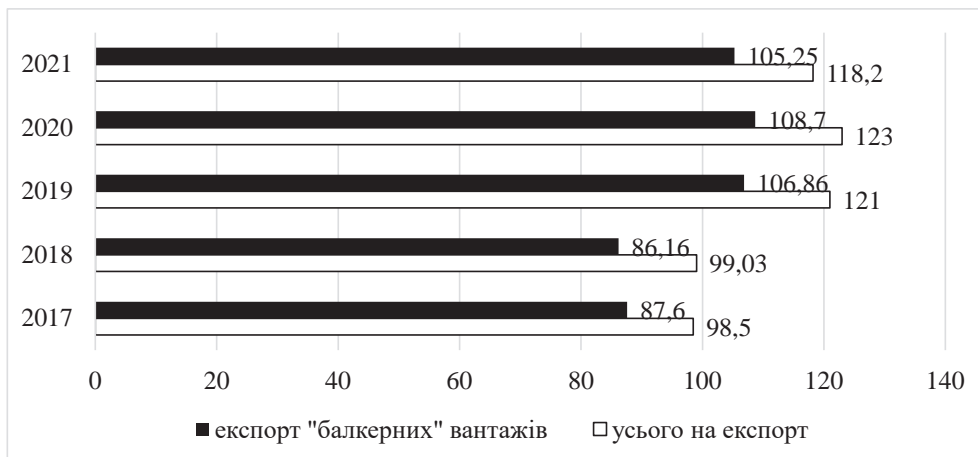


Рис. 2. Обсяги перевалки експортних вантажів в українських портах, млн. т

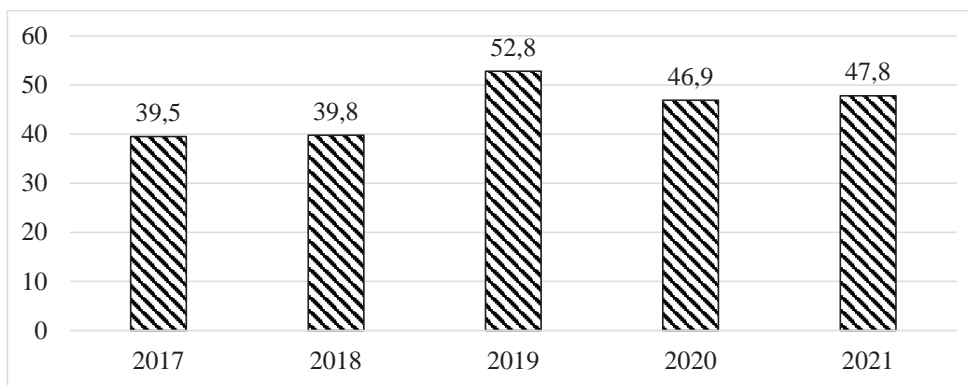


Рис. 3. Перевалка експортного зерна українськими портами, млн. т

Вантажем номер 1 для наших портів є зерно. І це не дивно – завдяки родючим ґрунтам та добре розвинутому сільському господарству наша країна є значним виробником зернової продукції. Враховуючи доволі обмежене внутрішнє споживання, левова частка зібраних щороку врожаїв надходить на експорт. При цьому важливу роль у транспортуванні вирощеної зернової продукції відіграє саме морський транспорт – обсяги перевалки експортного зерна в українських портах стабільно перевищують позначку у 40 млн. т (рис. 3).

Звісно, обсяги експорту залежать від зібраних врожаїв, що у свою чергу залежить від природних та кліматичних умов кожного року. Рік від року обсяги зібраних врожаїв є різними, а відтак – і різними є обсяги експорту. Саме цим і пояснюються певні коливання та навіть «стрибки» у обсягах перевалки зерна на експорт в українських портах.

Враховуючи значущість обсягів українського зернового експорту та потужність вантажопотоків, зерно перевантажується на морські судна практично усіма вітчизняними портами, наразі лідерами з них є такі порти, як Одеса, Миколаїв,

Південний, Чорноморськ (рис. 4). Як можна переконатися з поданих даних, до 90% усього зерна, яке відвантажується на експорт українськими портами, завантажується на морські судна саме у названих портах. Зерно є традиційним вантажем наших портів та перевантажувальних терміналів, що дозволило на сьогодні мати розвинуту зернову портову інфраструктуру, високотехнологічне обладнання та досконалі технології вантажних робіт.

За іншими портами обсяги перевалки зерна є набагато меншими. Біля 1 млн. т експортних зернових вантажів щороку – саме такими показниками обсяги відвантажень цього вантажу характеризується структура вантажопотоків у таких портах, як Ольвія, Херсон, Бердянськ, Маріуполь.

Руда є вантажем номер два для вітчизняної портової сфери, забезпечуючи українські порти на 20% роботою. Прикмітно, що цей вантаж характеризується стабільною часткою – на відміну від, наприклад, згаданих вище зернових вантажів, обсяги експортних відвантажень яких характеризуються певними коливаннями, адже залежать від обсягів зібраного врожаю.

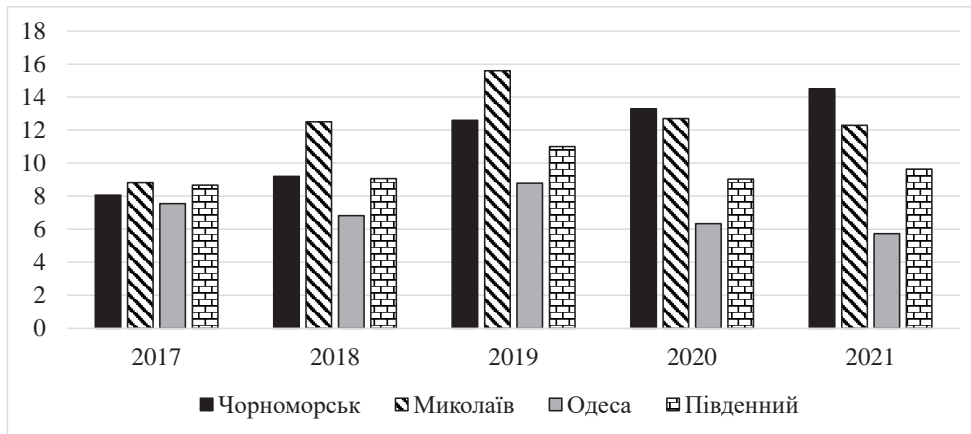


Рис. 4. Перевалка експортного зерна основними портами України, млн. т

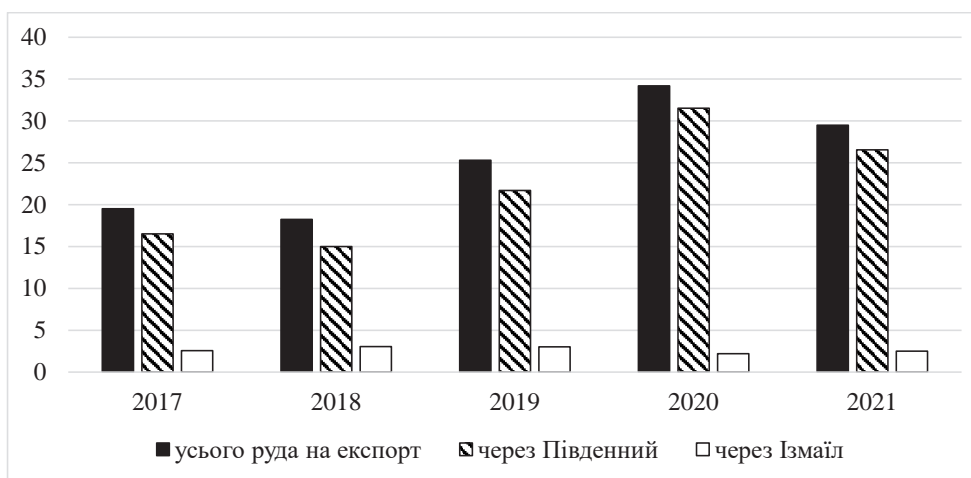


Рис. 5. Перевалка експортної руди українськими портами, млн. т

Основним рудним портом нашої країни є Південний, на частку якого перепадає приблизно 90% усього експортного рудного вантажопотоку, який обслуговується морським транспортом; у менших обсягах, що призводить і до відповідної меншої частки, експорт руди здійснюється також і через морський порт Ізмаїл (рис. 5).

Наразі переваги Південного на ринку перевалки руди порівняно із Ізмаїльським портом є очевидними – руда відноситься до вкрай дешевих за вартістю товарів сировинного походження, тож її транспортування здійснюється крупними партіями, що передбачає використання великотоннажних суден, які, завдяки великій осадці та обмеження глибин у причалів фізично не можуть заходити до Ізмаїльського порту.

Почесне третє місце серед вантажів, що формують основу вантажообороту українських портів за експортом, становить металопродукція, частка якої стабільно утримується на рівні 12–14% останніми роками. Обсяги відвантажень українськими портами

металу на експорт також є стабільними – вони міцно тримаються на рівні 14–15 млн. т на рік (рис. 6).

Це є доволі високими показниками, хоча і значно меншими порівняно із обсягами експорту металу до 2014 р. – коли більшість потужних підприємств вітчизняної чорної металургії опинились або на території проведення активних бойових дій на Донбасі або – на територіях, які непідконтрольні українській владі, так званих «ДНР» та «ЛНР».

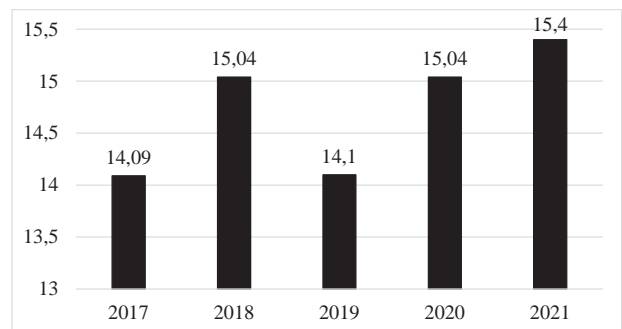


Рис. 6. Перевалка чорних металів на експорт українськими портами, млн. т

Враховуючи певну універсальність металопродукції з точки зору технології виконання вантажних робіт та відсутності необхідності у спеціалізованій портовій інфраструктурі (складських ємностей/площ та перевантажувального обладнання), практично усі вітчизняні порти у більшому або меншому ступені приймають участь у забезпеченні відвантажень металопродукції на морські судна (табл. 2).

Основними «металевими» портами нашої країни наразі слід визнати Маріуполь та Одесу – порти, які традиційно, протягом усього періоду свого існування працювали на ринку перевалки металу, удосконалюючи технології та нарощуючи технічні потужності. Втім, обсяги перевалки чорних металів Маріупольським портом значно зменшились після вже згаданих подій 2014 р. – порт опікувався відвантаженнями на експорт саме продукції металургійних заводів та комбінатів Донбасу. Тож після 2014 р. основним вантажопотоком металу, який прямував на зовнішні ринки через причали Маріупольського порту, стала металопродукція двох гігантів металургійної галузі, розташованих безпосередньо у цьому портовому місті – МК «Азовсталь» та МК ім. Ілліча. Меншу, але теж важливу частку вантажообігу Маріуполя за металом, становила продукція металургійних підприємств Дніпропетровщини.

Обсяги перевалки добрив на експорт вітчизняними портами суттєво скоротились останніми роками, зменшивши відповідно і частку цього вантажу у вантажообігу портів України. На сьогодні відвантаження на експорт добрив через українські порти ледь сягає 1 млн. т по окремих роках. Добрива наразі ніколи не були у переліку основних вантажів вітчизняних портів – лівова частина вироблених добрив надходила на внутрішній ринок, вітчизняним аграріям, адже Україна – аграрна країна, то й попит на них тут є та

Таблиця 2

Перевалка металопродукції українськими портами, млн. т

Порти	2017	2018	2019	2020	2021
Маріуполь	3,8	4,42	4,41	4,11	5,0
Миколаїв	3,06	3,15	2,85	2,88	3,09
Одеса	3,71	5,08	4,52	3,25	4,32
Південний	1,02	1,03	1,19	2,65	0,86
Ольвія	0,4	0,3	0,18	0,5	0,57
Херсон	0,3	0,22	0,28	0,28	0,23
Чорноморськ	1,66	0,68	0,42	1,01	0,93

був високим. Останніми роками впало і виробництво – адже багато які підприємства хімічної галузі також зосереджені на Донбасі.

Серед українських портів, які працюють із експортними добривами, ключовим є порт Південний, який відвантажує продукцію Одеського припортового заводу, власне для чого і було збудовано цей порт ще за радянських часів. До 90% усього добривного експорту прямує зараз саме через цей порт (рис. 7); у значно менших обсягах із експортом добрив працює також Миколаївський порт.

Висновки. Останніми передвоєнними роками показники роботи портів вказують на те, що українські порти, здебільшого, успішно працювали під час недавніх глобальних криз і збоїв у ланцюзі поставок. Військова агресія РФ цілком змінила роботу портів – з лютого по червень 2022 р. перевалку вантажів зупинено і поновлено лише липнем 2022 р. – коли за ініціативою ООН було відкрито так званий «зерновий коридор» із можливостями для українських портів відвантажувати на експорт вітчизняну зернову продукцію. Інші вантажі наразі не відвантажувались, то останні два роки (2022–2023 рр.), звісно, не відображують реальний вантажообіг українських портів за структурою вантажів.

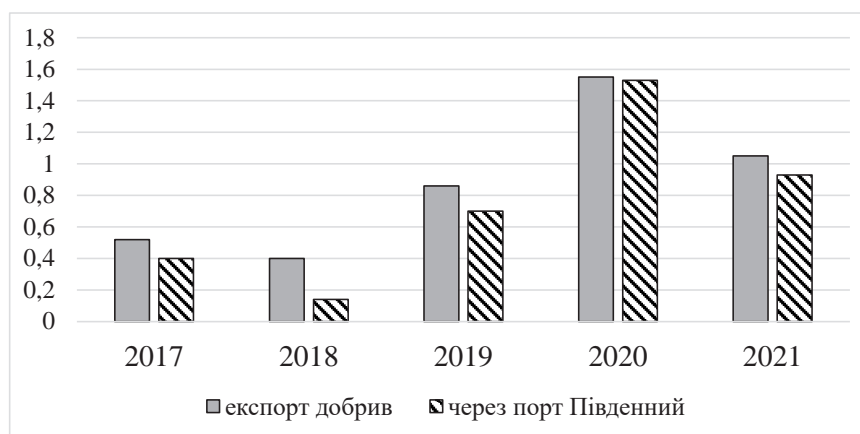


Рис. 7. Перевалка експортних добрив у портах, млн. т

Список літератури:

1. Review of Maritime Transport. United Nations Publications. 2022. 195 p.
2. Лисенко С. За роки незалежності український флот скоротився у 16 разів. URL: <https://gmk.center/ua/opinion/za-roki-nezalezhnosti-ukrainskij-flot-skorotivsia-u-16-raziv/> (дата звернення: 06.12.2023 р.)
3. Статистичний збірник «Транспорт України 2022». URL: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/publ8_u.htm (дата звернення: 07.12.2023 р.)
4. Про підприємство. URL: <https://www.uspa.gov.ua/pro-pidpryemstvo> (дата звернення: 06.12.2023 р.)
5. Панчук А.О. Сучасні форми управління морськими портами та проблеми адміністрування морської галузі в Україні. *Lex Portus*. 2019. № 1 (15). С. 50–67. DOI 10.26886/2524-101X.1.2019.4
6. Яцкевич І.В. Базові елементи державного управління розвитком морських портів. *Публічне управління і адміністрування в Україні*. 2020. Вип. 20. С. 67–72. DOI <https://doi.org/10.32843/pma2663-5240-2020.20.12>
7. Федяй Н.О. Ефективність стратегічного управління розвитком морських портів України. *Ефективна економіка*. 2021. № 9. DOI: 10.32702/2307-2105-2021.9.81 URL: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/9_2021/83.pdf (дата звернення: 06.12.2023 р.)
8. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. Класичні системи управління портами та їх концептуальні моделі. *Наукові вісті Давіського університету*. 2023. №24. DOI: <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2023-24>. URL: http://nvdu.snu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/06/index_2023_24.pdf. дата звернення: 06.12.2023 р.)
9. Kirillova E., Makushev P., Perepichko M., Piterska V., Raskevych I. Security assurance of port services as a factor of their competitiveness. *Technology audit and production reserves*. 2020. Vol 1, No 2(51). P/ 17-23. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.197733>
10. Кішак І.Т., Порудєєва А.В. Морські порти України в контексті підвищення їх конкурентоспроможності. *Приазовський економічний вісник*. 2018. Вип. 6 (11). С. 42–46.
11. Корнієнко О.П., Кошара К.А. Функції морських портів України як складової морегосподарського комплексу. *Економіка та держава*. 2018. № 5. С. 48–51.
12. Згама А., Зятіна Д. Сучасні тенденції розвитку морегосподарського комплексу в Україні та світі. *Підприємництво, господарство і право*. 2021. № 2. С. 158–163.
13. Кириллова О.В., Кириллова В.Ю. Теоретичні основи просторової та функціональної еволюції портів. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2022. № 40. С. 170–189. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-15>
14. Дьякова М.С. Статистичний огляд розвитку морської портової галузі України. *Theoretical and Practical Aspects of Economics and Intellectual Property ' 2014*. Issue 1(10), Volume 2. С. 282–287.
15. Решетков Д.М., Павлова Н.Л. Вплив пандемії COVID-19 на роботу морських портів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Том 32 (71) № 6. С. 231–238. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.6/37>
16. Коскіна Ю.О., Дрожжин О.Л. Аналіз обсягів та динаміки морського експорту зерна Україною. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2020. № 35. С. 205–215. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-35-20>
17. Шибаєв О.Г., Коскіна Ю.О., Кравченко О.А., Акімов К.С. Вантажопотоки вугілля в українських портах: ретроспективний огляд і сучасний стан. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Том 34 (73) № 5. С. 386–390. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.5/59>
18. Наврозова Ю.О. Оцінка тенденцій ринку перевалки небезпечних вантажів. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті*, (3(68), 16–29. <https://doi.org/10.31375/2226-1915-2019-3-16-29>

Koskina Yu.O., Reshetkov D.M., Tykhonin V.I. TURNOVERS OF EXPORT DRY BULK CARGOES IN THE PORTS OF UKRAINE

The paper presents the review of cargo turnovers of dry bulk cargoes in Ukrainian ports for the period 2017–2021, until the moment of the full-scale invasion of the Russian Federation, which significantly changed the production activity of port terminals, making cargoes handling impossible. Cargoes classified as dry bulk cargoes in global statistics – grain, ore, coal, fertilizers – a significant share of the cargo turnover of domestic ports, being almost 90% of all cargo handled in the ports of Ukraine. In a certain sense, this corresponds to the structure of our country's foreign trade, the export component of which is largely formed by goods of raw material origin, which in the field of transport refer specifically to dry bulk cargoes. The structure of cargo turnovers of dry bulk cargoes is practically unchanged in recent years. The main cargo of Ukrainian ports is grain – the basis of domestic exports. The port capacities of Ukraine for handling of grain, respectively, are developed at a high technical and technological level. The article presents the volumes of transshipment of grain for export and identifies the main grain ports of our country. The second place is occupied by goods and raw materials of the mining industry – ore and metal products. Despite a certain decrease in the share of metals products, which is due to military actions since 2014 in Donbas, where the main enterprises of the metallurgical industry are concentrated, the share of ore in the cargo turnover of Ukrainian ports shows a certain growth trend. The main “ore” port of our country is Pivdennyi, while metal, due to relative technological and technical versatility, is handled in many Ukrainian ports. Fertilizers produced in Ukraine mostly went to domestic consumers – agriculture, but were never shipped in significant quantities for export. In recent years, the war in Donbas also affected the decrease in the volume of goods shipped for export – similarly to the ferrous metallurgy enterprises, significant capacities of the chemical industry are located there. The main port for the export of fertilizers is the Pivdennyi port.

Key words: dry bulk cargoes, turnovers, maritime transport, ports of Ukraine.

УДК 629.463.65
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/29>

Фомін О.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

Козинка О.С.

Державний університет інфраструктури та технологій

Безлуцький В.О.

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

Литвиненко А.С.

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

ЗОВНІШНІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ СКЛАДОВИХ РУХОМОГО СКЛАДУ ЗАЛІЗНИЦЬ

У цій статті розглянуті зовнішні системи контролю температурних режимів складових рухомого складу залізниць. Роль буксових вузлів у рухомому складі. Експлуатаційні умови та зовнішні фактори, що впливають на буксовий вузол колісної пари рухомого складу. Важкі експлуатаційні умови і зовнішні фактори, температурні та погодні умови навколишнього середовища призводять до того, що букси повинні забезпечувати мінімальний опір обертанню колісних пар, високу надійність роботи та безпека руху вагона в цілому. Розглянуто вітчизняне обладнання та засоби контролю перегріву букс. Автоматизовані системи контролю стану буксових вузлів (ПВНАБ, ДІСК, КТСМ). Загальний принцип роботи таких систем полягає у сприйнятті чутливими елементами (приймачами) імпульсів інфрачервоної енергії, перетворенні їх в електричні сигнали, а також формуванні інформації про наявність та розташування незадовільних букс у рухомому складі. Також розглянуте закордонне обладнання світових компаній для моніторингу небезпеки на залізниці (TADS, PEGASUS, AGUILA, FUES-EPOS). Компанія ITSS (Іспанія) є провідним виробником і постачальником обладнання для моніторингу небезпеки на залізниці. Компанії Progress Rail Inspection, Information Systems та Voestalpine Signaling Siershahn (Німеччина), які спеціалізуються на технологіях діагностики та моніторингу залізничних споруд та рухомого складу залізниць. Компанія Infrared Materials Incorporated (США) є виробником високоефективних інфрачервоних детекторів. Система виявлення нагріву букс, що використовується в Австрії компанією Österreichische Bundesbahnen (ÖBB) Infrastruktur Betrieb AG. Контроль різними системами дозволяє здійснювати інтелектуальний моніторинг рухомого складу відповідно до індивідуальних вимог. Також нами були розглянуті промислові прилади, як спосіб вимірювання нагріву букс.

Ключові слова: буксовий вузол, перегонні системи контролю, контроль технічного стану, автоматизовані системи контролю.

Постановка проблеми. Одна з основних проблем, пов'язаних із надійністю рейкового транспорту, це експлуатаційний ресурс підшипників, що використовуються у візках, тягових двигунах і редукторах. Підвищення надійності буксового вузла є пріоритетним завданням, як підвищення безпеки руху поїздів, так і поліпшення економічних показників використання рухомого складу. За експлуатаційних умов виникають різні несправності букс, найчастіше викликані впливом зовнішніх умов, механічними деформаціями, забрудненням, порушенням технології виготовлення, обслуговування та ремонту вантажного рухомого складу. Технічний

стан та працездатність буксових вузлів визначаються головним чином температурою нагріву підшипників. Від технічного стану буксового вузла залежить температура шийки осі, внутрішні зазори, в'язкість мастила.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технічна діагностика є складовою технічного обслуговування. Основним завданням технічного діагностування є забезпечення безпеки, функціональної надійності та ефективності роботи технічного об'єкта, а також скорочення витрат на його технічне обслуговування та зменшення втрат від простоїв внаслідок відмов та передчасних висновків у ремонті з метою повнішого

задоволення потреб країни у перевезеннях вантажів і пасажирів. Успішне вирішення цього завдання на залізничному транспорті значною мірою залежить від технічного стану рухомого складу та насамперед вагонного парку. Для підтримки вагонів та локомотивів у постійній справності на залізницях України знайшла застосування планово-попереджувальна система ремонту. При ремонті та технічному обслуговуванні вагонів застосовуються засоби технічної діагностики та системи контролю. Ці засоби служать для об'єктивного виявлення як видимих, і прихованих дефектів вагонів у стаціонарних умовах і під час руху поїзда.

Метою роботи є аналіз зовнішніх систем контролю температурних режимів складових рухомого складу залізниць. Для досягнення поставленої мети, треба виконати ряд завдань:

- експлуатаційні умови, що впливають на буксовий вузол;
- вітчизняне обладнання та засоби контролю перегріву букс;
- закордонне обладнання для моніторингу небезпеки на залізницях;
- промислові прилади, як спосіб вимірювання нагріву букс;
- роль буксових вузлів у рухомому складі.

Виклад основного матеріалу. Існуючі засоби безконтактного контролю не дозволяють однозначно та безпомилково визначати технічний стан букс вагона [2, с. 22; 8, с. 238]. Це обумовлено тим, що існуюча технологія контролю рівня нагріву букс була розроблена ще в середині минулого століття і була розрахована на буксові вузли вагонів, обладнаних так званими типовими циліндричними роликівими підшипниками. Принцип дії сучасних безконтактних засобів теплового контролю полягає в оцінці теплового випромінювання (температури), яке надходить від буксових вузлів вагонів, що рухаються, на датчики контролю, встановлених по обидва боки від колії. Камери передають дані про температуру букс на перегінні пристрої, а далі інформація надходить до лінійного пункту контролю.

На залізницях світу широкого поширення набули напольні системи безконтактного контролю перегрітих буксів, т.з. детектори гарячих букс (Hot Box Detector, HBD) з використанням приймачів ІЧ-випромінювання. Детектори нагрітих букс встановлюються на коліях з інтервалом 25–40 км і служать для виявлення перегрітих букс на ходу поїзда. У статті розглянуто автоматизовані системи контролю та моніторингу нагріву буксових вузлів.

Експлуатаційні умови та зовнішні фактори, що впливають на буксовий вузол колісної пари рухомого складу, є відповідальним вузлом у ходовій частині рухомого складу і служать для передачі статичних та динамічних навантажень на вісь колісної пари та забезпечення обертання колісної пари під час руху вантажного вагона [1, с. 219]. Букси сприймають і передають колісним парам вагу кузова, а також динамічні навантаження, що виникають при русі вагона та при проходженні кривих ділянок колії, стрілочних переводів, стикових з'єднань, при гальмуванні колеса, за наявності дефектів на поверхні катання коліс. Шийку осі колісної пари від забруднення та пошкодження оберігають буксові вузли. Вони також є резервуаром для мастила та місцем розміщення підшипників.

Важкі експлуатаційні умови і зовнішні фактори, температурні та погодні умови навколишнього середовища призводять до того, що букси повинні забезпечувати мінімальний опір обертання колісних пар, високу надійність роботи та безпека руху вагона в цілому. Тому до їх конструкції та розрахунків при проектуванні, а також до технологічного процесу ремонту надаються особливі вимоги [6, с. 156].

Вітчизняне обладнання та засоби контролю перегріву букс.

Під час руху поїзда через тертя підшипника о вісь виділяється тепло, яке розсіюється кількома шляхами: через шийку осі на колесо і вісь, і через підшипник на корпус букси. При несправності підшипників температура підвищується. Тому працездатність буксових вузлів визначається головним чином температурою нагрівання підшипників та шийки осі. Отже, для забезпечення нормальної роботи та контролю працездатності необхідний розрахунок температурного режиму буксових вузлів за різних умов теплопередачі [3, с. 81; 4, с. 36]. Це питання можна вирішити за допомогою автоматизованої системи контролю стану буксових вузлів (ПВНАБ, ДІСК, КТСМ). Загальний принцип роботи таких систем полягає у сприйнятті чутливими елементами (приймачами) імпульсів інфрачервоної енергії, перетворенні їх в електричні сигнали, а також формуванні інформації про наявність та розташування незадовільних букс у рухомому складі.

Перший прилад для автоматичного безконтактного виявлення перегрітих букс поїздів, що проходять. ПВНАБ – був створений та випробуваний у 1950-х роках компанією Servo Corporation і одразу став широко застосовуватися на залізницях

різних країн. ПВНАБ (прилад виявлення нагрітих букс), автоматичний прилад для виявлення нагрітих букс, які загрожують руйнуванням або пожежею на залізниці (рис. 1). Вивчення технічного стану вагонів в експлуатації виявило необхідність розробки спеціальних пристроїв для виявлення в першу чергу букс, що гріються, дефектів поверхні катання коліс, заклинювання колісних пар, деталей, що волочатся. Ці пристрої досить широко застосовуються на залізницях України [5, с. 9].

Принцип дії приладів виявлення нагрітих букс полягає в тому, що нагріті букси випускають інфрачервоне випромінювання, яке сприймається чутливими елементами, що знаходяться в спеціальних камерах, розташованих по обидва боки шляху. За інтенсивністю випромінювання можна будувати висновки про ступень нагрівання букси. У камерах відбувається перетворення випромінювання на електричний сигнал, який посилюється і передається на реєструючу апаратуру. Апаратура ПВНАБ складається з перегінного та станційного обладнання, пов'язаного між собою лінією зв'язку. До складу перегінного обладнання входять напольне та постове обладнання. Напольне обладнання включає в себе приймальні камери інфрачервоного випромінювання. Якщо гріється букса, значить, нагрівається і вісь колісної пари, в результаті чого може статися її злам або заклинювання колісної пари.



Рис. 1. Прилад виявлення нагрітих букс ПВНАБ (ДИСК-Б)

Пристрої КТЗМ – це комплекс технічних засобів модернізований напольний (рис. 2) для контролю за станом рухомого складу. Система може виконувати наступні функції: виявлення перегрітих букс, виявлення загальмованих колісних пар, виявлення обірваних деталей, виявлення дефектів коліс по колу катання, виявлення відхилень верхнього габарита рухомого складу, виявлення перевантаження вагона [7, с. 38].

Засоби контролю на кожному пункті їх установки включають в себе перегонне і станційне обладнання, пов'язане між собою кабельною лінією зв'язку. Перегінне обладнання, в свою чергу, підрозділяється на напольне і постове,

а станційне на реєструюче і сигналізуюче. Напольне обладнання засобів контролю встановлюється безпосередньо на шляху і призначене для зчитування інформації з рухомого складу. Сигнали від напольного обладнання надходять по кабелю до постового обладнання, розміщеного в спеціальному приміщенні.



Рис. 2. Комплекс технічних засобів КТЗМ

Комплекс технічних засобів (КТЗМ) призначений для модернізації апаратури виявлення перегрітих букс типу ПВНАБ і ДИСК-Б шляхом заміни електронних блоків у стійці перегінної на технічні засоби КТЗМ.

Додатково КТЗМ здійснює: визначення нагріву шківів у пасажирських вагонах, контроль стану кожного з датчиків рахунку осей, визначення типу рухомої одиниці (локомотив, пасажирський чи вантажний вагон), визначення швидкості кожного вагона на контрольній ділянці, підрахунок загальної кількості осей у поїзді, автоматичну та дистанційну діагностику роботи всіх складових частин комплексу та напольного обладнання. На (рис. 3) зображена модель, яка демонструє зону огляду букси приймачем ІЧ-випромінювання за нової орієнтації напольної камери в КТЗМ.

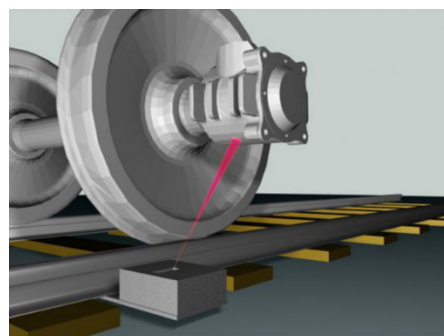


Рис. 3. Зона огляду букси приймачем ІЧ-випромінювання в КТЗМ

Закордонне обладнання для моніторингу небезпеки на залізниці. 1. Наприклад в Америці більш складні, дорогі мережеві пости точної ранньої

діагностики забезпечують, спільно з системою прогнозування, контроль поїздів у зоні обслуговування одного поста в кілька тисяч кілометрів за вартості комплексу засобів акустичного контролю підшипників, наприклад системи TADS (рис. 4), яка приблизно коштує 500 тис. дол.



Рис. 4. Система акустичного виявлення колії (TADS)

2. Компанія ITSS (Іспанія) є провідним виробником і постачальником обладнання для моніторингу небезпеки на залізниці. Системи компанії PEGASUS і AGUILA використовують найсучасніші інфрачервоні та волоконно-оптичні технології, що робить ці системи надзвичайно надійними навіть у найскладніших умовах експлуатації. Системи ITSS (рисунок 5) оснащені функціями самоконтролю та прогнозного аналізу, які можуть завчасно виявити потенційні проблеми. Системи також побудовані на основі резервних і відмовостійких компонентів для мінімізації помилкових сповіщень. Витрати на технічне обслуговування зазвичай невеликі, оскільки системи є модульними, автоматично калібруються та можуть обслуговуватися дистанційно. Компоненти системи можна замінити на місці за кілька хвилин.



Рис. 5. Система PEGASUS Hot Box Detection ITSS (Іспанія)

Сканери використовують кілька променів для підвищення надійності. Відскановані значення для окремих осей і гальм кожного вагона поїзда обробляються електронним обладнанням, встановлені біля колії і передаються в диспетчерську.

Система PEGASUS має вбудовану запатентовану технологію інтелектуального контролю вібрації (IVC), яка використовує спеціальні датчики прискорення. PEGASUS пропонує засоби

для додавання систем автоматичної ідентифікації транспортних засобів (AVI) і систем виявлення транспортного засобу (DED) із вбудованими системами відеоспостереження.

Система AGUILA використовує точну волоконно-оптичну технологію. На додаток до стану коліс AGUILA також може повідомляти про стан баласту, вагу поїзда та перевантаження. AGUILA можна встановити протягом кількох годин, а датчики можна замінити протягом п'яти хвилин. Система повідомляє всі виміряні значення та сповіщення в диспетчерську. Усі звітні дані архівуються та можуть бути отримані для кожного поїзда, осі чи колеса. Дані коліс і осей також можна відображати у вигляді 2D і 3D теплових зображень і діаграм.

3. Компанія Progress Rail Inspection та Information Systems у Німеччині. Виробляє системи виявлення нагрітих буксів FUES-EPOS (рис. 6).



Рис. 6. Система FUES-EPOS (Німеччина)

Понад 1000 систем встановлено у складних умовах пасажирських залізничних перевезень у Європі. FUES працює у широкому діапазоні швидкостей, від 3 км/год до 500 км/год (1,86 миль/год до 310 миль/год) і повністю сумісний з різними типами поїздів, вагонів, підшипників та існуючими гальмами, що використовуються на залізницях.

4. Компанія Infrared Materials Incorporated (США) є виробником вискоєфективних інфрачервоних детекторів. Інфрачервоні детектори зазвичай класифікуються як теплові або фотонні (квантові).

5. Компанія Voestalpine Signaling Siershahn (Німеччина) спеціалізується на технологіях діагностики та моніторингу залізниці. Дозволяє здійснювати інтелектуальний моніторинг рухомого складу відповідно до індивідуальних вимог.

6. Система виявлення нагріву букс, що використовується в Австрії компанією Österreichische Bundesbahnen (ÖBB) Infrastruktur Betrieb AG, складається з наступних елементів: колійне постове обладнання (сканери) – (блок оцінки та контролю, апаратура передачі даних, блок візуального відображення).

В даний час існує безліч конструкцій детекторів гарячих букс, різниця між якими полягає в типі застосовуваних приймачів ПЧ-випромінювання, пристрої та розміщення робочих камер з обладнанням, способах обробки та передачі інформації [3, с. 82; 4, с. 37].

Промислові прилади, як спосіб вимірювання нагріву букс. Широкого поширення пірометри (інфрачервоні термометри) в промисловості набули завдяки можливості безконтактного вимірювання температури на технологічному обладнанні та продукції, що випускається. Також важливим фактором є можливість вимірювання високих температур при обробці металу з безпечною для оператора дистанції або контролю режиму роботи силового обладнання, що знаходиться під напругою. Крім діапазону вимірювання та точності, найважливішою характеристикою пірометрів є фокусування оптики. Саме цей параметр впливає на діаметр області вимірювань пірометра і на точність вимірів зі збільшенням відстані до об'єкта що вимірюється.

Компанія «HORIBA» (Японія) – пропонує широкий спектр приладів та систем для різних сфер застосування. Від автомобільних досліджень та розробок, моніторингу процесів та навколишнього середовища, виробництва напівпровідників та метрології до широкого спектру наукових досліджень та вимірювань контролю якості.

Роль буксових вузлів у рухомому складі полягає [3, с. 82]: 1. Зниження тертя: Буксові вузли дають змогу зменшити силу тертя між колесами і рейками, що покращує рух вагона і дає змогу знизити енерговитрати на переміщення поїзда. 2. Пом'якшення ударів: Букси також виконують роль амортизаторів, поглинаючи удари і вібрації

під час руху нерівностями шляху і підвищуючи комфорт пасажирів. 3. Збільшення терміну служби: Використання буксових вузлів сприяє зменшенню зносу коліс і рейок, що підвищує термін служби всього рухомого складу і зменшує витрати на обслуговування і ремонт. 4. Забезпечення безпеки: Буксові вузли, які правильно функціонують, забезпечують стабільність і надійність руху поїзда, що є важливою умовою безпеки на залізничних коліях.

Висновки. Основним напрямом удосконалення засобів контролю та діагностики вагонів є їх максимальна автоматизація. Максимальна автоматизація передбачає повну відмову від роботи оглядачів вагонів шляхом використання автоматизованих систем неруйнівного контролю, які визначають визначення дефектів вагонів на ходу поїзда при підході до станції. При цьому відбраковування вузла або деталі вагона здійснюється автоматично без участі оператора.

Нами були розглянуті автоматизовані діагностичні системи контролю технічного стану вагона на ходу поїзда, які повинні виявляти такі несправності вагонів: контроль температури буксового вузла і загальмованих коліс; контроль волочиння; контроль габаритних розмірів вагонів; контроль дефектів колеса по колу катання; контроль геометричних параметрів колеса; контроль параметрів ударно-тягового механізму; контроль нерівномірності завантаження вагонів; контроль сповзання букси з шийки осі.

Застосування комплексних систем рухомого складу дає змогу підвищити безпеку руху завдяки виробленню рекомендацій про індивідуальні обсяги ремонту кожної одиниці рухомого складу з урахуванням дійсного технічного стану, плюс важливий економічний ефект.

Список літератури:

1. Сосунов Н. Н. Підвищення ефективності процесів експлуатації та технічного обслуговування рухомого складу у системі ремонтних підприємств галузі. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. Луганск, 2006. С. 219–223.
2. Мартинов І. Е., Петухов В. М., Труфанова А. В., Бабенко А. О., Шовкун В. О. Інноваційні технології моніторингу технічного стану буксових вузлів вагонів вбудованими системами контролю. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 3 (5). С. 22–27. doi:10.20998/2413-4295.2020.01.03.
3. Ваганов О. І., Добровольська С. В., Возикова Л. М., Першочергові завдання розробки і впровадження сучасних засобів контролю та діагностики стану рухомого складу. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. 2017. 2(11). С. 81–84. doi:10.32 684/2412-5288-2017-2-11-81-84.
4. Борзилов І. Д., Калуга Г. А. Впровадження сучасних засобів технічного діагностування буксових вузлів рухомого складу залізниць. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Машинознавство та САПР. 2018. 25 (1301). С. 36–39.
5. Петухов В. М., Варницький М. І. Удосконалення технічного обслуговування буксових вузлів за допомогою вбудованих засобів контролю. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2014. вип. 147. С. 9–13.

6. Равлюк В. Г. Вагоноремонтні машини та обладнання : конспект лекцій. Харків : УкрДАЗТ, 2014. Ч. 3. 156 с.

7. Равлюк В. Г. Передовий досвід технічного утримання вагонів: конспект лекцій. Харків : УкрДУЗТ, 2018. Ч. 1. 58 с.

8. Петухов В. М. Використання енергозберігаючих технологій при контролі буксових вузлів. *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* Харків : УкрДУЗТ, 2015. Вип. 153. С. 238–243.

9. Равлюк В. Г. Вібродіагностика та методи діагностування підшипників кочення буксових вузлів вагонів. *Зб. наук. праць Донец. ін-ту залізнич. трансп.* Донецьк, 2010. Вип. 21. С. 177–189.

Fomin O.V., Kozynka O.S., Bezlutskyi V.O., Lytvynenko A.S. EXTERNAL CONTROL SYSTEMS OF THE TEMPERATURE MODES OF RAILWAY ROLLING STOCK

This article discusses external temperature control systems for railway rolling stock components. The role of axle assemblies in rolling stock. Operational conditions and external factors affecting the axle unit of a rolling stock wheelset. Difficult operating conditions and external factors, temperature and weather conditions of the environment lead to the fact that axle boxes must provide minimal resistance to rotation of wheel sets, high reliability of operation and safety of the car movement as a whole. Domestic equipment and means of controlling axle box overheating are considered. Automated systems for monitoring the condition of axleboxes (PVNAB, DISC, KTSM). The general principle of operation of such systems is to perceive infrared energy pulses by sensitive elements (receivers), convert them into electrical signals, and generate information on the presence and location of unsatisfactory axle boxes in rolling stock. The article also considers foreign equipment from global companies for monitoring railroad hazards (TADS, PEGASUS, AGUILA, FUES-EPOS). ITSS (Spain) is a leading manufacturer and supplier of equipment for monitoring railroad hazards. Progress Rail Inspection, Information Systems and Voestalpine Signaling Siershahn (Germany), which specialize in diagnostic and monitoring technologies for railway structures and rolling stock. Infrared Materials Incorporated (USA) is a manufacturer of high-performance infrared detectors. Axle box heating detection system used in Austria by Österreichische Bundesbahnen (ÖBB) Infrastruktur Betrieb AG. Control by various systems allows for intelligent monitoring of rolling stock in accordance with individual requirements. We also considered industrial devices as a way to measure the heating of axle boxes.

Key words: axle box assembly, distillation control systems, technical condition control, automated control systems.

УДК 621.787: 629.331 (Транспорт)
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/30>

Хітров І.О.

Національний університет водного господарства та природокористування

Кононогов Ю.А.

Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства»

ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ ТА СПОСОБИ ДЛЯ ЙОГО ЗДІЙСНЕННЯ

Сектор машинобудування забезпечує створення нових технологій, матеріалів та деталей машин (автомобілів, тракторів, дорожніх, сільськогосподарських та інших). Підтримання заданих виробничих експлуатаційних характеристик деталей машин протягом усього періоду їх роботи досягається належним технічним сервісом (обслуговування і ремонт). Для відновлення деталей машин застосовуються різні способи, на вибір яких впливає матеріал деталі, величина спрацювання, характер навантаження, собівартість відновлення та ін. У ремонтному виробництві за простотою і доступністю широко застосовуються способи відновлення деталей (їх робочих поверхонь) з обмеженим або відсутнім тепловим впливом, забезпечуючи при цьому ресурс деталей не нижче нових. Серед таких особливої уваги заслуговують способи відновлення деталей пластичним деформуванням, що ґрунтуються на використанні пластичних властивостей металу – під дією зовнішніх сил деформуватися без порушення цілісності. До них відносяться способи: правка, наклеп, осадження, роздавання, обкатування, електромеханічна обробка. Надійність роботи машин безпосередньо пов'язана з оптимальною якістю поверхневого шару деталей, яка досягається зміцнювальним поверхневим пластичним деформуванням (обкочування робочих поверхонь деталей, алмазне вигладжування, чеканка). Останні дослідження та практичні застосування таких методів дозволяють визначити оптимальні шляхи вдосконалення виготовлення або відновлення деталей з метою підвищення їхньої міцності та довговічності. Метою статті є опис процесу відновлення деталей пластичним деформуванням та аналіз ефективних методів для його здійснення. Стаття спрямована на висвітлення технічних аспектів пластичного деформування, його застосування у відновленні спрацьованих деталей, а подальші дослідження якого можуть бути направлені на досягнення оптимальних результатів підвищення ефективності за рахунок застосування у вигляді зміцнювальної технології в машинобудуванні під час виготовлення нових деталей або їх відновлення власними силами господарств (майстерень).

Ключові слова: машина, деталь, відновлення, пластична деформація, поверхнєве зміцнення, довговічність.

Постановка проблеми. В процесі експлуатації більшість деталей машин (85–90%) виходять з ладу внаслідок спрацювання (зношування) їх робочих поверхонь [1, с. 22]. Найбільша кількість деталей (біля 83%) має зношування до 0,6 мм, основна частка яких припадає на зовнішні та внутрішні циліндричні поверхні – 52% [2, с. 10; 3, с. 70].

В процесі експлуатації машин нерухомість посадки порушується внаслідок спрацювання спряжених поверхонь. В міру зростання величини спрацювання збільшуються зазори в спряженнях, зростає динамічне навантаження, виникають вібрації, прискорюється процес руйнування поверхонь, що вразі зменшує їх довговічність (ресурс).

Для відновлення нерухомих спряжень в основному використовуються способи термічного

впливу шляхом дугового наплавлення, електроконтактного наварювання, газотермічного напилення та ін. Однак ці технології не в повній мірі відповідають певним вимогам (зниження собівартості відновлення, підвищення стійкості проти фретингу, абразивного спрацювання і втоми).

Тому, актуальною задачею є використання в ремонтному виробництві способів з обмеженим або відсутнім тепловим впливом, які дозволяють відновлювати деталі з малими величинами спрацювань (до 0,3 мм), забезпечуючи при цьому їх ресурс не нижче, ніж нових. Одним із таких простих і доступних способів в будь яких умовах виробництва є відновлення і зміцнення деталей пластичним деформуванням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останніх десяти років проблема відновлення, зміцнення та підвищення довговічності

деталей машин (автомобілів, тракторів, сільськогосподарських машин) із застосуванням пластичного деформування активно привертає увагу науковців як в Україні, так і за її межами. Значний науковий внесок у створенні певних механічних властивостей відновлених деталей з використанням різних технологічних методів поверхневої обробки внесли такі вчені, як Анілович В.Я., Скобло Т.С., Науменко О.А., Молодик М.В., Мудрук О.С., Черновол М.І. та багато інших.

В наукових джерелах найчастіше наводять дослідження з обґрунтування вимог до поверхневого, зміцненого шару деталей під час їх виготовлення і подальшій експлуатації [4–6]. Однак застосування пластичного деформування в ремонтному виробництві для відновлення різного роду деталей недостатнє, що вимагає виконання самостійних досліджень [2, 7, 8].

Такі дослідження мають на меті розширити розуміння процесу пластичного деформування, сприяти вдосконаленню методів відновлення деталей, а також підвищенню якості та здатності машини виконувати своє функціональне призначення.

Метою статті є опис процесу відновлення деталей пластичним деформуванням та аналіз ефективних методів для його здійснення. Стаття спрямована на висвітлення технічних аспектів пластичного деформування, його застосування у відновленні спрацьованих деталей, а подальші дослідження якого можуть бути направлені на досягнення оптимальних результатів підвищення ефективності за рахунок застосування у вигляді зміцнювальної технології в машинобудуванні під час виготовлення нових деталей або їх відновлення власними силами господарств.

Виклад основного матеріалу. Якість поверхні деталі визначається геометричною характеристикою і фізико-механічними властивостями його поверхневого шару (структури, мікротвердості, наявності залишкових напружень тощо) [9, с. 173]. Така оцінка може проводитися за допомогою візуального огляду, вимірюванням параметрів поверхні з використанням спеціалізованого оснащення (інструментів, пристроїв, обладнання) для контролю якості.

Взаємозв'язок між якістю і довговічністю деталі, як процес вдосконалення матеріалів, конструкції та обробки (відновлення), спрямований на збільшення тривалості її експлуатації без втрати якості чи функціональності, досить тісний і визначається кількома ключовими факторами:

1. Використання матеріалів високої якості для забезпечення кращої стійкості до зношування, корозії та триваліший термін служби.

2. Оптимізація конструктивного виконання деталі (розробка більш ефективних конструкцій, які зменшують напруження та зношування під час роботи, моделювання робочих умов та випробування на виявлення слабких місць).

3. Технологічні інновації (використання новітніх технологій обробки та виробництва для покращення якості деталі). Наприклад, методи обробки і зміцнення деталей пластичним деформуванням часто забезпечують кращу стійкість до зношування.

4. Аналіз виробничих процесів (огляд та аналіз кожного етапу виробництва для виявлення можливих проблем, які можуть вплинути на довговічність деталі).

5. Систематичний контроль якості (для уникнення дефектів та забезпечення однорідності якості). Ретельний аналіз деталей дозволяє виявляти можливі слабкі місця, дефекти або недоліки, що можуть призвести до скорочення терміну експлуатації машини в цілому. Розуміння таких аспектів дозволяє вдосконалювати технологічні і виробничі процеси.

6. Удосконалення під час експлуатації (збір та аналіз даних про роботу деталі під час експлуатації для виявлення можливостей її поліпшення).

7. Технічне обслуговування і ремонт (надання рекомендацій з правильного використання та обслуговування деталі для запобігання прискореному зношуванню).

Підвищують довговічність деталей в машинобудуванні і ремонтній справі різними способами: загартування струмами високої частоти, нанесення гальванічних покриттів, азотування, а також поверхневим пластичним деформуванням (ППД) тощо.

В загальному, під деформацією розуміємо зміну розміру і форми деталі внаслідок зміни температури або прикладеної сили [6, с. 13]. Залежно від розміру, матеріалу та прикладеної сили можуть виникати різні форми деформації:

– пружна деформація (оборотна деформація, яка зникає після зняття прикладеної сили). Наприклад, робота пружини підвіски автомобіля;

– пластична деформація (деформація незворотна і залишається навіть після зняття прикладених сил). Наприклад, закручування торсіонного валу або згинання сталевих стрижнів.

В ремонтній практиці спосіб відновлення (зміцнення) поверхні деталі пластичним деформуванням базується на використанні пластичних властивостей матеріалу, що проявляється у здатності металу деформуватися (без порушення цілісності) під дією зовнішніх сил шляхом

його перерозподілу з неробочих елементів деталей на зношені [10, с. 120].

Для відновлення деталей машин широкого розповсюдження набули способи пластичного деформування у вигляді правки, рихтування, наклепу, осадження, роздавання, обкатування [8, с. 149]. Особливістю кожного способу полягає у перерозподілі деформуючої сили F з напрямом необхідної деформації металу δ (рис. 1).

Принципові відмінності електромеханічного способу відновлення деталей від багатьох інших способів полягає в тому, що в процесі відновлення досягається значне підвищення фізико-механічних властивостей активного поверхневого шару деталі без додаткових операцій термічної обробки. При цьому сам процес відновлення базується на перерозподілі матеріалу відновлюваної деталі, що забезпечує значне збільшення використання матеріалу.

Технологічний процес відновлення складається з двох операцій: висадки металу і згладжування посадочної поверхні до певного розміру. Принципова відмінність цих операцій полягає в відмінності контактних напружень. При висадці на контактній поверхні утворюється гвинтовий виступ, а при згладжуванні цей виступ зменшується до необхідного розміру, площа контактної поверхні збільшується. Згладжування забезпечує: збільшення контактної поверхні спряженої деталі і зниження її шорсткості; збільшення твердості

і пружних властивостей контактної поверхні; необхідний натяг спряження і його міцність.

Суть електромеханічної обробки полягає в тому, що через місце контакту інструменту з деталлю проходить струм великої сили і низької напруги (рис. 2). Це приводить до сильного локального нагрівання поверхні, чим спричинюється зниження міцності і твердості металу та полегшуються деформація і згладжування металу деталі під тиском інструменту в процесі обробки, а після закінчення обробки поверхневий шар зміцнюється.

Пристрій (накатник) для електромеханічної обробки складається з пластини, що кріпиться трьома болтами на плиті поперечного супорта токарно-гвинторізного верстата і накатної головки, яка може плавно переміщуватися і закріплюватися на плиті пристосування, забезпечуючи таким чином, мінімальний кут прикладання зусилля деформування при накатуванні. Накатна головка пристрою складається із важеля, коромисла, на одному кінці якого на осі встановлюється ролик, а на другому кінці прикладається необхідне зусилля деформування за допомогою пружини стискання і шпильки з гайкою (рис. 3).

Поверхнєве пластичне деформування (поверхнєве зміцнення) – це процес зміни форми або структури матеріалу, який відбувається на поверхні без значної зміни обсягу або глибини

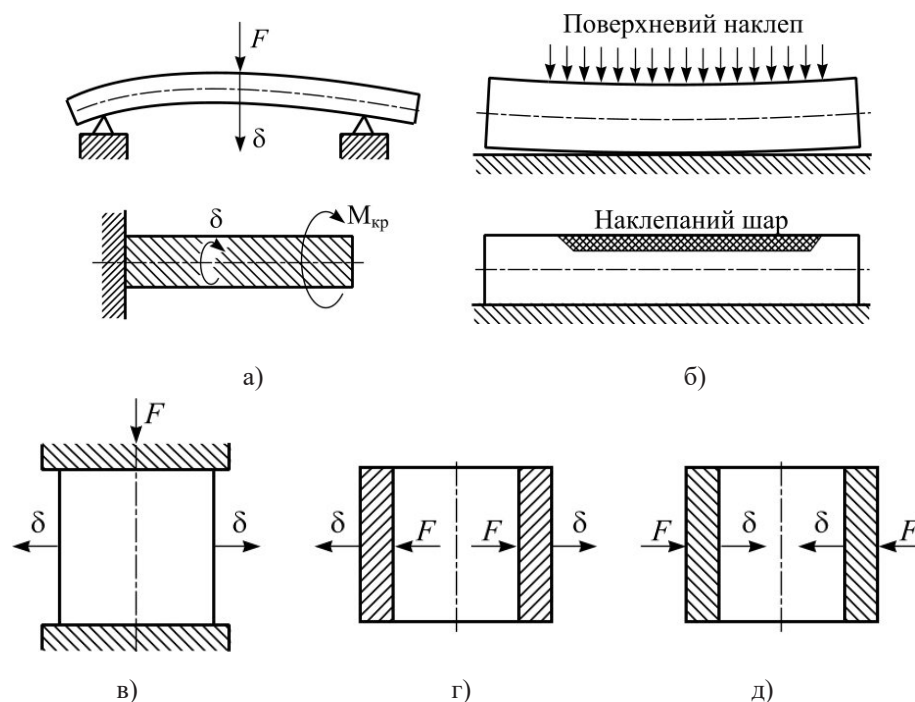


Рис. 1. Схема відновлення деталі статичним навантаженням (а), поверхневим наклепом (б), осадженням (в), роздаванням (г) та обтискуванням (д)

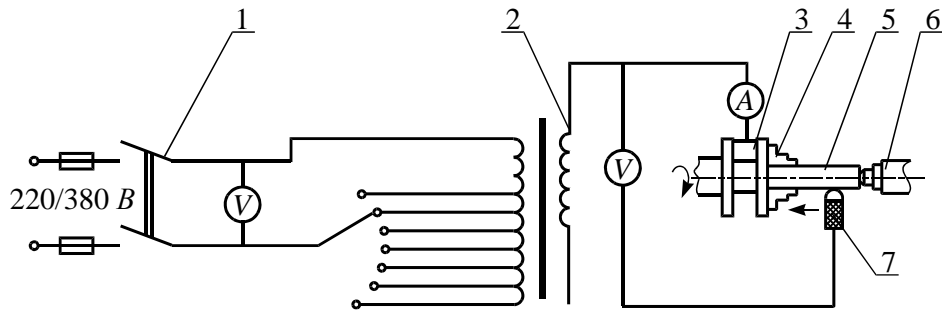


Рис. 2. Схема електромеханічної обробки деталі: 1 – вимикач; 2 – вторинна обмотка; 3 – пристрій для підведення струму; 4 – патрон токарного верстату; 5 – деталь, яка підлягає відновленню; 6 – задня бабка; 7 – пристрій (накатник)

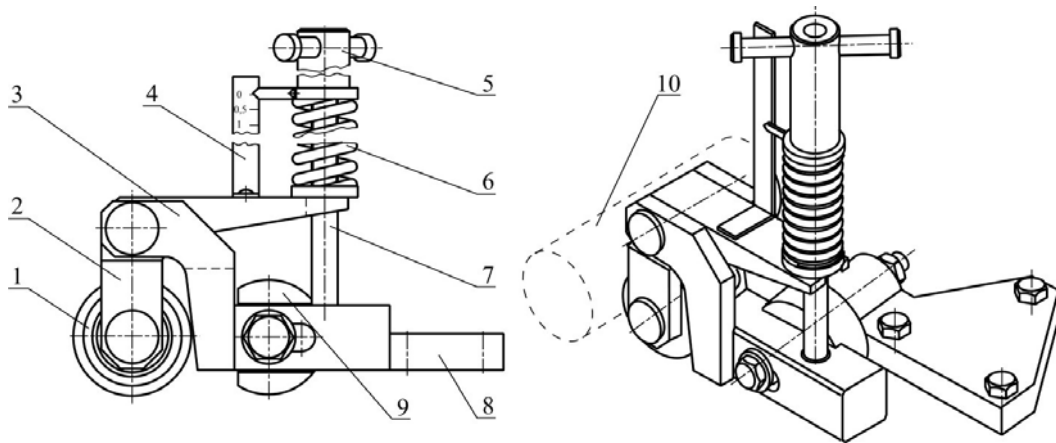


Рис. 3. Схема одноролікового пристрою: 1 – ролик; 2 – коромисло; 3 – важіль; 4 – шкала; 5 – гайка; 6 – пружина; 7 – шпилька; 8 – пластина; 9 – втулка; 10 – деталь, поверхня якої підлягає відновленню

самого матеріалу. Це відбувається через застосування зовнішнього навантаження, що призводить до розтягування, стиснення, згинання або зміни форми поверхні матеріалу. Цей процес може мати різноманітні застосування, від роботи з металами до полімерів та інших матеріалів. Важливою особливістю поверхневого пластичного деформування є те, що воно відбувається на поверхні матеріалу, не впливаючи значно на його об'ємні властивості або структуру всередині.

Зміцнення поверхні деталі пластичним деформування найчастіше застосовують в таких випадках роботи елементів конструкції [5, с. 49]:

1. Циклічна дія повторних навантажень (розтягування, стиснення, згин, скручування або їх поєднання).

2. Тривала дія статичних навантажень, здатних спричинити руйнування деталей.

3. Наявність мікропереміщень з подальшим розвитком фретинг-корозії поверхні (наприклад, відновлення посадочних отворів корпусної деталі під підшипник кочення).

4. Посилення захисту від дії агресивного середовища (корозії).

5. При виготовленні нових деталей або усуненні виробничих дефектів.

6. За наявності крихкого покриття (хромування, анодування).

Способи поверхневого пластичного деформування поділяються на статичні (робоче тіло інструмента діє на оброблювану поверхню з певною постійною силою) та ударні (робоче тіло або середовище багаторазово діє на оброблювану поверхню із змінною силою) – рис. 4.

Висновки. У цій статті ми розглянули процес відновлення (зміцнення) деталей за допомогою пластичного деформування та виявили його важливість у вирішенні завдань ремонту та відновлення функціональності деталей різної номенклатури.

Дослідження показали, що пластичне деформування може бути ефективним методом відновлення, забезпечуючи не лише відновлення форми, але і підвищення поверхневої міцності та довговічності. Застосування сучасних технологій та інно-

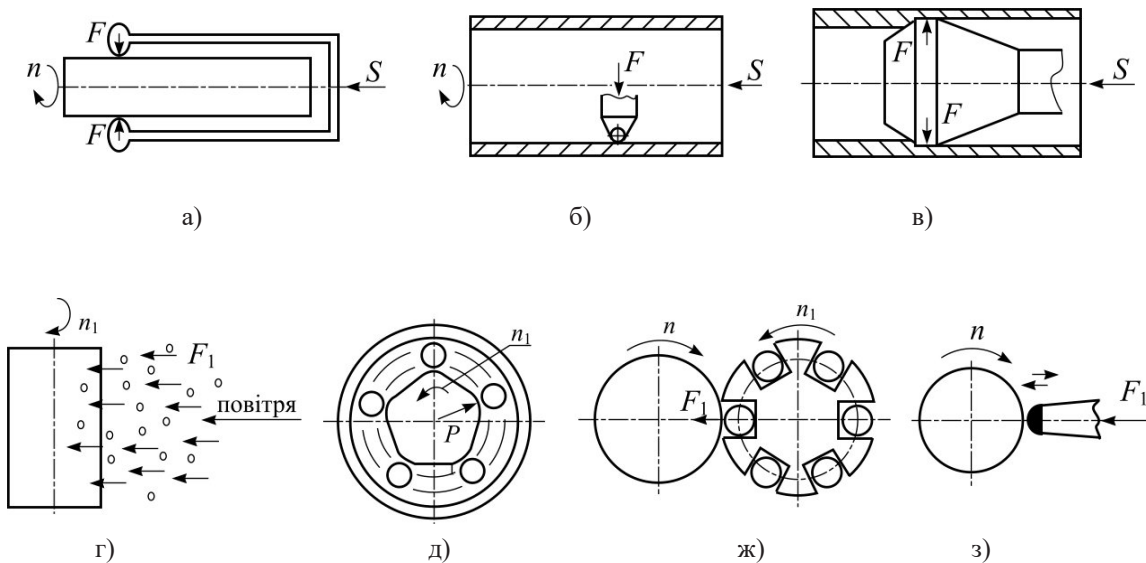


Рис. 4. Способи поверхневого пластичного деформування (зміцнення) деталей статичні (а – обкочування; б – вигладжування; в – дорнування) та динамічні (г – дробоструменева обробка; д – ударне розкочування; ж – відцентрова обробка; з – зміцнювальна чеканка)

вацій в області машинобудування і ремонту сприятиме покращенню якості та ефективності процесу.

Остаточний висновок полягає в тому, що пластичне деформування, як важливий інструмент

в арсеналі методів відновлення деталей, дозволить підвищити характеристики міцності поверхневого шару, що, в свою чергу, сприятиме підвищенню експлуатаційної надійності машин.

Список літератури:

1. Закалов О. В., Закалов І. О. Основи тертя і зношування в машинах : навч. посіб. Тернопіль : Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. 322 с. <https://core.ac.uk/download/pdf/60787657.pdf>.
2. Технологічне забезпечення якості відновлення посадочних отворів корпусних деталей : монографія. / Хітров І. О., Гавриш В. С., Кононогов Ю. А., Фастовець П. М. Рівне: НУВГП, 2013. 128 с. <https://ep3.nuwm.edu.ua/2394/1/729815%20zah.pdf>.
3. Лузан С. О., Бантковський В. А. Оцінка номенклатури деталей машин, що визначають ресурс. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Машинознавство та САПР. 2022. № 1. С. 67–73. <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2022.1.06>.
4. Plastic Deformation Behavior of Metal Materials: A Review of Constitutive Models. / Xiangdong J., Kunming H., Zhan L., Zhenyu F. *Metals*. 2022, 12(12), 2077. <https://doi.org/10.3390/met12122077>.
5. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин : навч. посіб. / Фесенко А. Г. та ін. Дніпропетровськ : РВВ ДНУ, 2015. 104 с. <https://cutt.ly/JwJxGDxU>.
6. Нові технологічні процеси з використанням прогресивних методів пластичного деформування: монографія. / О. В. Нахайчук та ін. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. 158 с.
7. Відновлення зношених деталей сільськогосподарської техніки пластичним деформуванням. / Іванкова О. В., Бартош В. Ю., Обчий Я. О., Кисіль Ю. Ю. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. 2023. Issue 25 (1). Рр. 23–29. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2023-25-01-073>.
8. Зміцнення деталей за допомогою поверхнево-пластичної деформації. / Паніна В. В., Дідур В. В., Сірий І. С., Чорна Т. С. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2020. Вип. 10. Т. 2. С. 148-155. <https://cutt.ly/dwJxHdQz>.
9. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування : монографія. / Фролов Є. А., Кравченко С. І., Попов С. В., Гнітько С. М. Полтава : ПНТУ, 2019. 204 с. <https://dspace.pdau.edu.ua/server/api/core/bitstreams/ab64c1c1-ee69-4b41-be34-334b98e8e9c9/content>.
10. Хітров І. О., Гавриш В. С. Ремонт машин і обладнання : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2011. 184 с. <https://ep3.nuwm.edu.ua/2214/1/721022%20zah.pdf>.

Khitrov I.O., Kononogov Yu.A. RECOVERY OF PARTS BY PLASTIC DEFORMATION AND METHODS FOR ITS IMPLEMENTATION

The machine-building sector ensures the creation of new technologies, materials and machine parts (cars, tractors, road, agricultural and other vehicles). Maintaining the performance characteristics of machine parts specified by the manufacturer throughout the entire period of their operation is achieved through proper technical service (maintenance and repair). Various methods are used to restore machine parts, the choice of which is influenced by the material of the part, the amount of wear, the nature of the load, the cost of restoration, etc. Due to their simplicity and accessibility, methods of restoring parts (their working surfaces) with limited or no thermal impact are widely used in repair production, ensuring that the service life of parts is not lower than new ones. Among these, special attention should be paid to the methods of restoring parts by plastic deformation, which is based on the use of the plastic properties of metal – under the influence of external forces, it can deform without compromising its integrity. These include the following methods: straightening, tacking, deposition, dispensing, rolling, and electromechanical processing. The reliability of machines is directly related to the optimal quality of the surface layer of parts, which is achieved by hardening surface plastic deformation (rolling of the working surfaces of parts, diamond smoothing, and chasing). Recent research and practical applications of such methods make it possible to determine the best ways to improve the manufacture or restoration of parts in order to increase their strength and durability. The purpose of the article is to describe the process of restoring parts by plastic deformation and to analyze effective methods for its implementation. The article is aimed at highlighting the technical aspects of plastic deformation, its application in the restoration of worn parts, and further research on which can be aimed at achieving optimal results of efficiency improvement through its use as a strengthening technology in mechanical engineering in the manufacture of new parts or their restoration by the own forces of farms (workshops).

Key words: vehicle, part, restoration, plastic deformation, surface hardening, durability.

Черненко П.В.

Національна академія Національної гвардії України

Цебрюк І.В.

Національна академія Національної гвардії України

РОЗРАХУНКИ ЩОДО ОБЛАДНАННЯ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ ЦЕХУ ЛАКОФАРБОВОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ АВТОБРОНЕТАНКОВОЇ ТЕХНІКИ

Технологічне обладнання і спеціалізований інструмент, призначені для ТО і ремонту транспортних засобів, є першоосною механізації. Вони визначають технічний рівень виробництва і міру досконалості технології ТО та ремонту транспортних засобів. Наголошено, що фарбування кузовів транспортних засобів на сучасному етапі є дуже важливим процесом, особливо через те, що під час дорожньо-транспортних пригод найбільше пошкоджується саме лакофарбове покриття. Організація цеху лакофарбового покриття для транспортних засобів відрізняється тим, що фарбувальні і ремонтні процеси тісно взаємопов'язані і представляють собою нерозривний ланцюг технологічних операцій. Важливо відзначити, що ці дві ділянки взаємодіють між собою, і відокремлювати їх не можна. Для організації цеху лакофарбового покриття для транспортних засобів необхідно ретельно продумати планування приміщення, так як неминуче постійне переміщення техніки між боксами фарбувальної і ремонтної ділянок. Перелічено необхідне обладнання створюваного цеху та дано опис технологічного процесу. Вибір необхідного обладнання, природно, передбачає порівняння різних варіантів технічного забезпечення робіт з урахуванням різноманітних критеріїв і чинників, визначення найкращого поєднання різноманітних місцевих виробничих умов і можливостей цеху, а також технічних можливостей технологічного обладнання цеху лакофарбового покриття для транспортних засобів. Кількість основного обладнання визначають за ступенем його використання. Якщо воно завантажене повністю протягом робочих змін, то розрахунок його кількості виконується за трудомісткістю робіт в людиногодинах за групою або за кожним видом робіт, є такі групи обладнання (верстатне, теплове, монтажно-демонтажне, підйомно-оглядове або спеціальне). Наведено черговість виконання розрахунків для підбору персоналу та оптимального завантаження цеху. Виробнича ефективність передбачає, що фарбувати транспортні засоби не можна за примітивною технологією 90-х років ХХ ст., а доцільно використовувати автоматизовану, комп'ютеризовану сучасну технологію.

Ключові слова: *обслуговування транспортних засобів, обслуговування, технологічних процесів ремонту, фарбування, емалі, кузовний ремонт, ґрунтовка, знежирення, автобронетанкова техніка.*

Постановка проблеми. Фарбування автобронетанкової техніки на сучасному етапі є дуже важливим процесом, особливо через те, що під час дорожньо-транспортних пригод, виконання службово-бойових завдань найбільше пошкоджується саме лакофарбове покриття автобронетанкової техніки. Нині використовуються високотехнологічні матеріали та складні методи нанесення лакофарбового покриття, спрямовані на його максимальний захист від корозії. Кузови автобронетанкової техніки під час експлуатації піддаються впливу різних факторів, таких як погодні умови, дорожні забруднення та механічні ушкодження [2].

Пошкодження лакофарбового покриття автобронетанкової техніки можуть виникати не тільки внаслідок аварій, виконання службово-бойових

завдань, але і під час самого процесу фарбування та після нього.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значні за обсягом дослідження з розробки та компонування цеху лакофарбового покриття на автомобілях проведені такими вченими, як Ядрошніков О.В. [4], Волков В.П. [1].

Так, фірмою Beulentechnik AG (зараз «Betag Innovation») [3] запропоновані швидкісні механічні способи нанесення лакофарбового покриття на автомобільних кузовах. Проте їх практичне здійснення вимагає високої кваліфікації виконавця і не є достатньо якісними з погляду збереження елемента, що відновлюється. Американськими інженерами запропоновано цілий ряд технічних способів видалення вм'ятин з металевих конструкцій.

Метою статті є проведення розрахунків щодо обладнання та продуктивності цеху лакофарбового покриття для автобронетанкової техніки.

Виклад основного матеріалу. Проведемо аналіз технологічного процесу фарбування автобронетанкової техніки. Початковим етапом є підготовка поверхні до фарбування, яка включає кілька кроків для забезпечення високої якості лакофарбового покриття. По-перше, стару фарбу можна видалити механічним шляхом, таким як дробо-піскоструминна обробка або занурення в розчин каустичної соди при певних температурах. Лужні водні розчини синтетичних миючих препаратів, таких як КМ-1, «Лобамід – 101», МЛ-52, МС-15, МГ-17 і т.д., також можуть бути використані для цього процесу. Для видалення іржі використовують хімічне травлення у розчині сірчаної або соляної кислоти при певних температурах. Після цього залишки кислоти нейтралізують відповідним розчином. Для видалення старої фарби можна також застосовувати спеціальні змиви, такі як АФТ-1 або СД.

Знежирення деталей проводять у різних лужних розчинах з додаванням емульгаторів при визначених температурах.

На підготовлену поверхню наноситься ґрунтовий шар товщиною 20–25 мікрметрів. При використанні нітроемалей для фарбування застосовують ґрунти, такі як ГФ-020 або № 138, розчинені в скипидарі. У випадку фарбування гліфталієвими емаллями, ґрунт готують на основі тих же смол, що і сама фарба. Процес сушки відбувається при природній температурі протягом 48 годин, або при температурі 100–110°C 0,5–1,0 години.

Шліфування після процедури шпаклювання виконують за допомогою наждачної шкурки № 150–280 або пемзи. Для цього застосовують

агрегати, такі як ШРСУ-8 або ручну пневматичну машинку РД-1. Далі переходять до нанесення лакофарбового покриття.

Сушка та затвердіння основних типів лакофарбових покриттів здійснюється через випаровування летючого розчинника та полімеризацію зв'язуючої речовини. Природна (холодна) сушка застосовується, наприклад, при фарбуванні швидко висихаючими (нітроцелюлозними) емаллями. Штучна сушка відбувається за допомогою гарячого повітря в сушильних камерах, де гарячий потік постачається зверху, а холодний видаляється знизу системою відсмоктування.

Завершальна обробка лакофарбових покриттів включає шліфування шкуркою № 320–360, подальше обдування стисненим повітрям, промивання водою і обтирання розчинником № 648, сушку та полірування пастою № 289. Для надання блиску поверхні використовується натирання лакофарбового покриття фланеллю.

Організація цеху лакофарбового покриття для автобронетанкової техніки відрізняється тим, що фарбувальні і ремонтні процеси тісно взаємопов'язані і представляють собою нерозривний ланцюг технологічних операцій. Важливо відзначити, що ці дві ділянки взаємодіють між собою, і відокремлювати їх не можна. Фарбування автомобіля розпочинається і закінчується на ділянці кузовного ремонту. Перед тим як нанести фарбу на кузов автомобіля, необхідно видалити всі елементи, які можуть завадити виконанню робіт. Після цього необхідно виправити будь-які пошкодження і ретельно підготувати поверхню для фарбування. Після завершення фарбувальних робіт встановлюють раніше зняті деталі назад на свої місця [1].

Таким чином, для організації цеху лакофарбового покриття для автобронетанкової техніки необ-

Таблиця 1

Основні види антикорозійної обробки кузова автомобіля

Код обробки	Вид обробки	Матеріал	Метод нанесення	Товщина нанесеного шару, мкм	Кількість шарів	Температура сушіння / час, °C/хв.	Метод контролю
1	Знежирення	Уайт-спірит, КМ-50	Вручну	-	-	60 / 3,5	Візуально
2	Фосфатування	КФ-1	Електро-форезне осадження	3	1	53 / 3,5	Візуально
3	Ґрунтування	ВКЧ-0207, ЭП-0228	Окунанням	40	5	150 / 30	Візуально
4	Фарбування	МЛ-197	Автоматизовано	90	3	100 / 30	Візуально
5	Захист dna кузова	БПМ-1, Д-11А	Ручне розпилення	1300	1	100 / 30	Візуально
6	Захист прихованих порожнин	НГМ-МЛ	Ручне розпилення	30	1	20 / 60	Візуально

хідно ретельно продумати планування приміщення, так як неминуче постійне переміщення техніки між боксами фарбувальної і ремонтної ділянок.

Дільниця цеху лакофарбового покриття для автобронетанкової техніки може бути розташована в пункті технічного обслуговування і ремонту загальною площею близько 105,7 м². На дільниці має бути зона приймання техніки, ремонтна зона, приміщення для підготовки під фарбування, фарбувальна камера. На дільниці цеху лакофарбового покриття для автобронетанкової техніки мають бути розташовані верстати для ремонту техніки, трансформатор зварювальний, фарбувальна камера, напівавтоматичний зварювальний апарат, рухомий пост огляду, стапель, пост приймання [4].

У цеху лакофарбового покриття для автобронетанкової техніки проводяться наступні роботи:

1. Ремонт і правка фарбуємої поверхні будь-якої складності із застосуванням сучасних стапельів і зварювального устаткування, з подальшим контролем. Для проведення кузовного ремонту техніки потрібне спеціальне обладнання: зварювальний апарат, набір ключів, болгарка, шліфувальна машина, кузовний стапель, підйомник техніки та інше обладнання. Сам кузовний ремонт передбачає розтягування і вирівнювання розбитого кузова на стапелі, ремонт і видалення тріщин, вм'ятин, відколів і подряпин.

2. Малярські роботи, що включають в себе наступні операції: миття, знежирення, шліфування, шпаклівка, остаточне шліфування і ґрунтовка, фарбування техніки в фарбувально-сушильній камері.

3. Комп'ютерний підбір автоемалі різних виробників в спеціальній лабораторії.

4. Повне і часткове забарвлення автобронетанкової техніки.

5. Антикорозійна обробка автобронетанкової техніки.

В цеху лакофарбового покриття для автобронетанкової техніки працюють 12 фахівців різних профілів, в середньому в день виробляється ремонт трьох-чотирьох одиниць транспортних засобів. Проаналізувавши можливий в перспективі об'єм зростання програми ремонту автобронетанкової техніки, зробимо таблицю устаткування дільниці фарбування.

Цех лакофарбового покриття для автобронетанкової техніки оснащений сучасним обладнанням:

– стенд для відновлення геометрії кузова Yamaksan;

– стапель для швидкого ремонту Postlift 10 та анкерна система Mitek;

– кузовні затискачі та випрямляє установка Dozen;

– електронна система вимірювання Shark та телескопічні лінійки;

– набори гідравлічних розтяжок і т.д.

Дане обладнання дозволяє виконати кузовний ремонт різного ступеня складності, від локального ремонту невеликих вм'ятин до відновлення кузова після серйозної аварії.

Основою цеху лакофарбового покриття для автобронетанкової техніки є наявність фарбувальної камери, яка представляє собою ізольований бокс, оснащений режимом регулювання температури, повітрявідводів і хорошим освітленням. Функціонування всіх фарбувальних камер відбувається в режимах фарбування і сушіння. Під час нанесення фарби в камеру зі стелі автоматично

Таблиця 2

Відомість обладнання дільниці фарбування автобронетанкової техніки

Найменування обладнання	Кількість	Тип або марка обладнання	Габаритні розміри обладнання, мм	Площа під обладнання м ²	Електрична потужність обладнання, кВт	Позиція
Верстак маляра	4	тип IV PCT УРСР 1804-77	500x400	0,8	-	1
Шафа для фарби	1	-	1000x800x 460	0,8	-	2
Віскозиметр настільний	1	-	-	-	-	3
Фарбоперемішувач	1	-	1150x450x900	0,52	1,3	4
Ящик для обтирочних матеріалів	2	-	1000x520x1825	0,52	-	5
Камера фарбувально- сушильна комбінована	1	-	8600x3200x 1800	27,52	8,5	6
Резервуар для палива	2	-	1407x820x 570	2,3	-	7

нагнітається тепле повітря (близько 25°C), який сприяє осадженню суспензії [3].

Після проведеної фарбування камера провітрюється і настає черга сушки. Цей процес можливий при піднятті температури в камері до 70°C і становить від 1 до 2 годин. Робота цієї системи починається в режимі рециркуляції, при цьому забір повітря з вулиці знижується в кілька разів, що значно економить електроенергію. Для цього часто спалюють природний газ або дизельне паливо.

Добова виробнича програма виступає як фактор, за допомогою якого визначається метод організації технічного обслуговування з фарбування вантажного автомобіля і є основним показником для розрахунку кількості постів і ліній. По видах технічного обслуговування з фарбування вантажного автомобіля добова виробнича програма визначається за виразом:

$$N_{io} = \frac{\sum N_{ip}}{D_{роб.р}}$$

де N_{ip} – річна програма по кожному виду ТО або діагностиці окремо;

$D_{роб.р}$ – річне число робочих днів зони в році, що приймаємо рівним 305 днів.

Для цеху лакофарбового покриття для вантажних автомобілів річне число робочих днів приймаємо 305. Розраховуємо добову виробничу програму на групу автомобілів за рік:

$$N_{об.д} = \frac{136000}{305} = 45$$

Проведемо розрахунок загальної кількості основного устаткування за наступною формулою:

$$n_{об} = \frac{T_o}{\Phi_{о.д} \cdot \eta_z},$$

де T_o – об'єм робіт, що виконуються на даному устаткуванні, люд. – год.;

$\Phi_{о.д}$ – реальний річний фонд часу устаткування, год.;
 η_z – коефіцієнт завантаженості устаткування, $\eta_z = 0,85 \dots 0,95$.

Потрібна кількість устаткування для забезпечення роботи технологічного процесу фарбування автомобільних кузовів:

$$\eta_{\epsilon} = \frac{150}{1943,88 \cdot 0,85} = 0,1, \text{ приймаємо } 1 \text{ установку.}$$

Для визначення потреб в річній електроенергії в цеху лакофарбового покриття для вантажних автомобілів використовуємо метод для визначення навантаження з поправочним коефіцієнтом

попиту, який враховує недостачу на потужності та нерівномірну роботу споживачів. Для різних груп споживачів вираховуємо активну потужність:

$$P_a = k_n \sum P_{вст}$$

де k_n – коефіцієнт попиту;

$\sum P_{вст}$ – загальна встановлена потужність групи, кВт. Визначаємо потужність:

– для обладнання виробничого процесу:

$$\sum P_{вст} = 7,3 \text{ кВт.} \quad P_a = 0,2 \cdot 7,3 = 1,46 \text{ кВт.}$$

– для миття деталей:

$$\sum P_{вст} = 8,5 \text{ кВт.} \quad P_a = 0,2 \cdot 8,5 = 1,7 \text{ кВт.}$$

Річна потреба в електроенергії:

$$W_p = \sum P_a \cdot \Phi_{о.д} \cdot \eta_z,$$

де η_z – коефіцієнт завантаження обладнання по часу, $\eta_z = 0,75$.

$$W_p = (1,125 + 4) \cdot 1693 \cdot 0,75 = 6547,46 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Дамо характеристику підйомника маніпулятора в цеху лакофарбового покриття для автобронетанкової техніки. Тип – канавний, універсальний; Підняття і опускання агрегатів – за допомогою підйомника-маніпулятора; Вантажність, Н–10000; Електродвигун привода підйомника – 4А 100S 4У3; Потужність електродвигуна, кВт – 3; Частота обертання, об./хв. – 1435; Електродвигун приводу горизонтального переміщення – 4А902А823; Потужність електродвигуна, кВт – 0,75; Частота обертання, об./хв. – 700; Утримання автомобіля в піднятому стані – за допомогою пересувних стояків; Хід гвинта підйомника – 500.

Розглянемо порядок розрахунку освітлювальної установки в робочому приміщенні розміром: довжина $A = 5$ м, ширина $B = 4$ м, висота $H = 2,2$ м. Визначаємо площу приміщення: $S = AB = 5 \cdot 4 = 20 \text{ м}^2$.

Вибираємо систему загального рівномірного освітлення з люмінесцентними лампами. Вибираємо світильник типу 770 А з чотирма люмінесцентними лампами ЛБ15 і знаходимо індекс приміщення за формулою:

$$i = \frac{AB}{h(A+B)} = \frac{5 \cdot 4}{2,2(5+4)} = 1.$$

Для житлового приміщення $H = h$.

Визначаємо коефіцієнт використання світлового потоку у цеху лакофарбового покриття для автобронетанкової техніки за наступними параметрами $\rho_n = 70\%$, $\rho_c = 50\%$, $\rho_p = 30\%$, $i = 1$: $\eta = 0,23$.

Приймаємо $K_s = 1,3$. Мінімальна освітленість E_{min} складає 100 лк. Далі визначаємо світловий потік лампи ЛБ 15. Номінальний світловий потік Ф

люмінесцентної лампи ЛБ15 дорівнює 780 лм. Коефіцієнт нерівномірності для люмінесцентних ламп приймаємо: $Z = 1,1$. За формулою визначаємо необхідне число світильників:

$$N = \frac{E_{\min} S K_3 Z}{\eta \Phi_{\lambda \eta}} = \frac{100 \cdot 20 \cdot 1,9 \cdot 1,1}{4 \cdot 780 \cdot 0,23} = 4.$$

Приймаємо для створюваного цеху 4 світильники типу 770 А. Проаналізуємо забезпечення цеху лакофарбового покриття для автобронетанкової техніки первинними засобами пожежогасіння. Потрібна кількість первинних засобів пожежогасіння визначається із співвідношення:

$$n = \frac{S_{\text{заг}}}{S_n}$$

де $S_{\text{заг}}$ – сумарна площа приміщень усіх поверхів будівлі, 1210 м²;

S_n – нормативна площа, приймаємо $S_n = 300$ м².

$$n = \frac{1210}{300} = 4,033 = 5$$

В якості первинних засобів пожежогасіння використовуються: вогнегасник ОУ–5, повсть та азбестове полотно, у кількості 5 комплектів.

Необхідний запас води, м³: $Q = 3600 \cdot \tau \cdot q$

де τ – середній час гасіння пожежі, 3 години; q – загальна витрата води, л·с⁻¹.

$$q = q_{\text{зовн}} + q_{\text{вн}} + q_{\text{авт}}$$

де $q_{\text{зовн}}$ – витрата води на зовнішнє пожежогасіння, л/с; $q_{\text{вн}}$ – витрати води на внутрішнє пожежогасіння, л/с; $q_{\text{авт}}$ – витрати води на автоматичні установки пожежогасіння, л/с;

$$V_{\text{будівл.}} = a \cdot b \cdot h = 36,5 \cdot 24,5 \cdot 7 = 6260 \text{ (м}^3\text{)}$$

При об'ємі будівлі 5–20 тис м³ витрата води на зовнішнє пожежогасіння 15 л/с на одну пожежу, внутрішнє пожежогасіння 5 л/с, автоматичне 30 л/с.

Загальна витрата води: $q = 15 + 5 + 30 = 50$ л·с⁻¹

Запас води: $Q = 3600 \cdot 3 \cdot 50 = 540000$ л·с⁻¹ = 540 (м³)

На завершення дослідження розрахуємо площу нагрівальних приладів для обігріву цеху. Приймаємо середню температуру зовнішнього повітря в період опалювального сезону $t_{\text{зов}} = -5$ °С. Середня допустима температура всередині дільниці фарбування буде:

$$t_{\text{сер}} = \frac{t_{\min} + t_{\max}}{2} = \frac{16 + 20}{2} = 18 \text{ (}^\circ\text{С)}.$$

Визначаємо геометричні характеристики об'єкта розрахунку. Так площа дільниці фарбування:

$$F = ab = 20 \times 18 = 360 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Об'єм повітря дільниці фарбування визначаємо по формулі:

$$V = F \times h = 360 \times 4 = 1440 \text{ (м}^3\text{)}.$$

Кількість теплоти, необхідної для опалення даного приміщення знаходимо по формулі:

$$Q_o = q_o \times (t_{\text{сер}} - t_{\text{зов}}) \times V =$$

$$= 2,08 \times (18 - (-5)) \times 1440 = 68890 \text{ (кДж/год)},$$

де $q_o = 2,08$ кДж/год – витрати теплоти для опалення 1 м³ приміщення.

Кількість теплоти, яку необхідно витратити на вентиляцію:

$$Q_v = q_v \times (t_{\text{сер}} - t_{\text{зов}}) \times V =$$

$$= 1,5 \times (18 - (-5)) \times 1440 = 49680 \text{ (кДж/год)},$$

де $q_v = 1,5$ кДж/год – витрати теплоти на вентиляцію 1 м³ будівлі.

Сумарні витрати на опалення і вентиляцію приміщення:

$$Q = Q_o + Q_v = 68890 + 49680 = 118570 \text{ (кДж/год)}.$$

Сумарна площа нагрівальних приладів на дільниці [27]:

$$F_{\Pi} = \frac{Q}{K_{\Pi} \cdot (t_{\Gamma} - t_{\text{В}})} = \frac{118570}{40 \cdot (100 - 18)} = 36,15 \text{ (м}^2\text{)},$$

де $K_{\Pi} = 40$ кДж/(м²·год·°С) – коефіцієнт для нагрівальних приладів із сталевих труб; $t_{\Gamma} = 100$ °С – середня розрахункова температура теплоносія у випадку пари низького тиску.

Висновки. Наголошено, що фарбування кузовів автобронетанкової техніки на сучасному етапі є дуже важливим процесом, особливо через те, що під час дорожньо-транспортних пригод, виконанні службово-бойових завдань найбільше пошкоджується саме лакофарбове покриття техніки. Виробнича ефективність передбачає, що фарбувати автобронетанкову техніку не можна за примітивною технологією 90-х років ХХ ст., а доцільно використовувати автоматизовану, комп'ютеризовану сучасну технологію. Наведені розрахунки будуть корисні для ремонтних підрозділів військових частин Національної гвардії України та інших військових формувань, під час проектування цеху лакофарбового покриття для автобронетанкової техніки.

Список літератури:

1. Волков В. П. Інноваційний розвиток технічної експлуатації автомобілів в умовах інтелектуальних транспортних систем. *Управління проектами, системний аналіз і логістика*. К.: НТУ. 2013. Вип. 12. С. 17–25.

2. Дмитриченко М. Ф. До оцінки життєвого циклу транспортних засобів. *Вісник Національного транспортного університету*. К.: НТУ, 2011. Вип. 22. С. 3–10.
3. Скрипін В. С. До питання щодо визначення постійних витрат на вантажному автомобільному транспорті. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті*. Херсон: ХДМА, 2016. С. 17–18.
4. Ядрошніков О. В. Управління технічним станом парків транспортних і технологічних машин на основі діагностування. *Прогресивні технології в транспортних системах*. 2015. С. 415–421.

Chernenko P.V., Tsebriuk I.V. CALCULATIONS REGARDING THE EQUIPMENT AND PRODUCTIVITY OF THE PAINT SHOP FOR ARMORED VEHICLES

The technological equipment and specialized tools designed for maintenance and repair of vehicles constitute the primary basis for mechanization. They determine the technical level of production and the degree of perfection in vehicle maintenance and repair technology. It was emphasized that the painting of vehicle bodies at the modern stage is a very important process, especially due to the fact that during traffic accidents, the paint coating itself is the most damaged. The organization of a paint shop for vehicles is distinguished by the fact that painting and repair processes are closely interconnected and represent an inseparable chain of technological operations. The interaction between these two areas is crucial, and their separation is impractical. To organize a paint shop for vehicles, it is necessary to carefully consider the layout of the room, as the constant movement of equipment between the boxes of the painting and repair areas is inevitable. The necessary equipment for the proposed shop is listed, and a description of the technological process is provided. The choice of the necessary equipment naturally involves a comparison of various options for the technical support of works taking into account various criteria and factors, determining the best combination of various local production conditions and workshop capabilities, as well as the technical capabilities of the technological equipment of the paint shop for vehicles. The quantity of primary equipment is determined by the degree of its utilization. If it is fully loaded during working shifts, the calculation of its quantity is based on the labor intensity of work in person-hours by group or by each type of work. There are several groups of equipment (machining, thermal, assembly-disassembly, lifting-inspection, or specialized). The sequence of calculations for staffing and optimal loading of the shop is provided. Production efficiency assumes that it is not possible to paint vehicles using the primitive technology of the 1990s of the XX century, but it is advisable to use automated, computerized modern technology.

Key words: maintenance of vehicles, maintenance, technological repair process, painting, enamels, body repair, priming, degreasing, armored vehicles.

БУДІВНИЦТВО

УДК 614.841

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/32>

Семичаєвський С.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Присяжнюк В.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Осадчук М.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Якіменко М.Л.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Свірський В.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ І МЕТОДІВ ВИПРОБУВАНЬ З'ЄДНУВАЛЬНИХ ГОЛОВОК ТА ПОЖЕЖНИХ НАПІРНИХ РУКАВІВ

У цій публікації наведено актуальність питання удосконалення нормативної бази, яка стосується пожежних з'єднувальних головок, а саме розроблення нового національного стандарту України, який стосується головок з'єднувальних для пожежного обладнання типу «Storz», що необхідно для реалізації вимог Технічного регламенту будівельних виробів, будівель і споруд. Також вказано на доцільність розроблення відповідного проекту зміни №1 до чинного в Україні національного стандарту ДСТУ 9069:2021.

Акцентовано увагу на тому, що на теперішній час відсутній єдиний європейський стандарт на з'єднувальні головки та пожежні рукави. Кожна країна використовує той або інший тип з'єднувальних головок та відповідних пожежних рукавів і має свій національний стандарт. Зазначено, що найбільша кількість пожежно-рятувальної техніки, яку отримали в якості гуманітарної допомоги пожежно-рятувальні підрозділи ДСНС України, укомплектована пожежними рукавами із пожежними з'єднувальними головками типу «Storz», що використовуються принаймні десятьма країнами світу, а саме Польщею, Німеччиною, Францією, Швейцарією, Швецією, Нідерландами, Італією, Великобританією, США та Австралією.

Представлено інформацію стосовно результатів раніше проведених аналогічних наукових досліджень та виявлено їх недоліки.

Наведено результати обґрунтування технічних вимог і методів випробувань з'єднувальних головок типу «Storz» та пожежних напірних рукавів.

Зазначено, що в результаті проведених аналітичних досліджень встановлено методи випробувань, які передбачено у проекті національного стандарту, а саме: перевірка зовнішнього вигляду; вимірювання розмірів головок; визначення стійкості головки до дії робочого та випробного тиску; випробування на стійкість до дії вакууму; випробування на стійкість до падіння з висоти; випробування на стійкість до дії високої температури; перевірка обертового зусилля для з'єднання (роз'єднання) з'єднувальних головок; перевірка середнього терміну служби головки; перевірка середнього терміну зберігання головки; перевірка середнього наробітку на відмову; випробування на стійкість до дії граничних температур експлуатації.

Наведено технічні характеристики та розписано методи випробувань з'єднувальних головок типу «Storz».

Встановлено основні зміни, які було враховано у проекті Зміни № 1 до національного стандарту України ДСТУ 9069:2021.

Ключові слова: головки з'єднувальні типу «Storz», методи випробувань, обґрунтування, пожежні рукави, технічні вимоги.

Постановка проблеми. Основні технічні вимоги до з'єднувальних головок та методи контролю їх якості викладені в національному стандарті України ДСТУ 3950-2000 [1]. Вищезазначений національний стандарт певною мірою застарів та поширюється виключно на з'єднувальні головки типу «Богданова».

На теперішній час відсутній єдиний Європейський стандарт на з'єднувальні головки та пожежні рукави. Кожна країна використовує той або інший тип з'єднувальних головок та відповідних пожежних рукавів і має свій національний стандарт. Останнім часом, майже в кожен територіальний підрозділ у вигляді гуманітарної допомоги була передана пожежно-рятувальна техніка від різних країн, яка укомплектована пожежними рукавами з різними з'єднувальними головками. Відповідні конструкції з'єднувальних головок суттєво відрізняються та як правило виготовляються виключно під певні діаметри пожежних рукавів, які характерні до застосування країною. Ці з'єднувальні головки та пожежні рукави за технічними характеристиками і конструкцією відрізняються від тих, що експлуатуються пожежно-рятувальними підрозділами ДСНС України та не відповідають вимогам діючих в Україні національних стандартів.

Також встановлено, що найбільша кількість пожежно-рятувальної техніки, яку отримали в якості гуманітарної допомоги пожежно-рятувальні підрозділи ДСНС України, укомплектована пожежними рукавами із з'єднувальними головками для пожежного обладнання типу «Storz», що використовуються принаймні десятьма країнами світу, а саме Польщею, Німеччиною, Францією, Швейцарією, Швецією, Нідерландами, Італією, Великобританією, США та Австралією.

Враховуючи вищенаведене, набуває актуальності питання удосконалення нормативної бази, яка стосується пожежних з'єднувальних головок, а саме розроблення нового національного стандарту України, який стосується головок з'єднувальних для пожежного обладнання типу «Storz». Це необхідно для реалізації вимог Технічного регламенту будівельних виробів, будівель і споруд.

Розроблення та впровадження в Україні нового національного стандарту нормативно врегулює класифікацію, технічні вимоги та порядок випробування з'єднувальних головок типу «Storz», а також використання даного виду головок пожежно-рятувальними підрозділами ДСНС України.

У зв'язку із розробленням вказаного проєкту національного стандарту, є доцільність розроблення відповідного проєкту зміни № 1 до чинного в Україні національного стандарту ДСТУ 9069:2021 [2], в частині приведення внутрішніх діаметрів напірних пожежних рукавів у відповідність до внутрішніх діаметрів головок з'єднувальних типу «Storz». Також зміна стосуватиметься деяких методів випробувань пожежних рукавів.

Впровадження в Україні Зміни № 1 до національного стандарту ДСТУ 9069:2021 [2] сприятиме ефективності застосування пожежно-технічного оснащення (головок з'єднувальних типу «Storz», пожежних рукавів) пожежно-рятувальними підрозділами під час виконання завдань за призначенням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У звіті [3] наведено результати пошукової науково-дослідної роботи з визначення шляхів удосконалення технічного рівня, ефективності застосування протипожежної, аварійно-рятувальної та іншої спеціальної техніки і обладнання.

Водночас, у цій роботі не розглянуто питання обґрунтування технічних вимог і методів випробувань з'єднувальних головок та пожежних напірних рукавів для подальшого розроблення відповідного національного стандарту України, який стосується головок з'єднувальних для пожежного обладнання типу «Storz» та внесення відповідних змін до національного стандарту, який стосується пожежних напірних рукавів.

Мета та завдання дослідження. З метою вирішення зазначеної проблеми, в Інституті державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту в рамках науково-дослідної роботи «Характеристики – пожежно - технічне оснащення» за замовленням ДСНС України було проведено обґрунтування технічних вимог і методів випробувань з'єднувальних головок та пожежних напірних рукавів, на підставі чого розроблено проєкт національного стандарту України ДСТУ XXXX:202X *Протипожежна техніка. Головки з'єднувальні типу «Storz». Загальні технічні вимоги та методи випробувань* та проєкт зміни № 1 до ДСТУ 9069:2021 [2].

Враховуючи вищезазначене, в цій публікації необхідно навести результати обґрунтування технічних вимог і методів випробувань з'єднувальних головок типу «Storz» та пожежних напірних рукавів.

Виклад основного матеріалу. Результати обґрунтування технічних вимог і методів випробувань з'єднувальних головок типу «Storz» та пожежних напірних рукавів

Проаналізувавши національні стандарти провідних країн світу щодо технічних вимог до з'єднувальних головок типу «Storz», а саме DIN 14333-2022 [4], DIN 14334-2020 [5], DIN 14335-2022 [6], PN – 51024:2015 [7], PN – 51031:2015 [8], PN – М – 51038 [9], PN – М – 51042:2015 [10], PN – 51046:2015 [11] та AS 2419.4:2021 [12], встановлено, що вони мають різні підходи і свої відмінності. Наприклад, стандарт Австралії AS 2419.4:2021 [12] передбачає 1 стандарт, в якому викладено технічні вимоги та методи випробувань, що поширюються на всі види з'єднувальних головок типу «Storz», а саме рукавні, муфтові, цапкові, перехідні та головки заглушки.

Німецькі стандарти DIN 14333-2022 [4], DIN 14334-2020 [5] та DIN 14335-2022 [6] мають декілька частин, в яких встановлено вимоги до кожного виду з'єднувальних головок окремо. У Польських нормах також існує низка стандартів, а саме PN – 51024:2015 [7], PN – 51031:2015 [8], PN – М – 51038 [9] та PN – М – 51042:2015 [10], що встановлюють вимоги до кожного виду з'єднувальних головок. Крім того, є національний стандарт Польщі PN – 51046:2015 [11], який стосується окремих елементів, а саме ущільнювачів для з'єднувальних головок.

Виходячи з вищевказаного та враховуючи той факт, що в Австралії використовують пожежні рукави та з'єднувальні головки типу «Storz» з внутрішніми діаметрами, найбільш наближеними до вітчизняних, під час розроблення проєкту національного стандарту України ДСТУ ХХХХ:202Х *Протипожежна техніка. Головки з'єднувальні типу «Storz». Загальні технічні вимоги та методи випробувань* нами було надано перевагу технічним вимогам і методам випробувань, які містяться у національному стандарті Австралії AS 2419.4:2021 [12].

В результаті проведених аналітичних досліджень встановлено методи випробувань, які передбаченно у проєкті національного стандарту, а саме:

- перевірка зовнішнього вигляду;
- вимірювання розмірів головок;
- визначення стійкості головки до дії робочого та випробного тиску;
- випробування на стійкість до дії вакууму;
- випробування на стійкість до падіння з висоти;
- випробування на стійкість до дії високої температури;
- перевірка обертового зусилля для з'єднання (роз'єднання) з'єднувальних головок;

- перевірка середнього терміну служби головки;
- перевірка середнього терміну зберігання головки;
- перевірка середнього наробітку на відмову;
- випробування на стійкість до дії граничних температур експлуатації.

Перевірка зовнішнього вигляду відноситься до органолептичного методу визначення показників якості продукції на основі аналізу сприйняття органів зору людини. Його метою є ідентифікація продукції. Перевагою методу є швидке визначення певних параметрів, при цьому застосування засобів виміральної техніки не потрібно. В той же час, показники, визначені за допомогою органолептики, мають свою суб'єктивність. В значній мірі достовірність отриманої таким чином оцінки залежить від досвіду випробувача.

Метод визначення показника «зовнішній вигляд» враховано у проєкті національного стандарту без змін згідно з ДСТУ 3950-2000 [1].

Метод вимірювання розмірів головок відноситься до методу визначення основних їх параметрів.

Числові значення внутрішніх діаметрів з'єднувальних головок у проєкті національного стандарту прийнято відповідно до сучасних вимог, наведених у стандарті Австралії AS 2419.4:2021 [12], а також у національному стандарті України щодо рукавів пожежних плоскоскладаних для пожежно-рятувальних автомобілів, а саме ДСТУ 9069:2021 [2].

Числові значення лінійних розмірів з'єднувальних головок у проєкті національного стандарту прийнято відповідно до сучасних вимог, наведених в стандарті Австралії AS 2419.4:2021 [12].

Методи визначення внутрішнього діаметра та лінійних розмірів з'єднувальних головок у проєкті національного стандарту прийнято згідно з вимогами ДСТУ 3950-2000 [1].

Гідравлічні випробування є одними із важливих видів випробувань для оцінки якості з'єднувальних головок та складаються із визначення стійкості головки до дії робочого та випробувального тиску.

На підставі проведених аналітичних досліджень у пункті 6.1.1.1 проєкту національного стандарту, враховуючи вимоги AS 2419.4:2021 [12] та ДСТУ ISO 7268 [13], прийнято, що напірні головки повинні витримувати робочий тиск, значення якого наведено в таблиці 1. У пункті 6.1.1.2 проєкту національного стандарту прийнято, що напірні головки повинні витримувати випробувальний тиск, який повинен в 1,5 рази перевищувати робочий тиск. Значення випробувального тиску також наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Дозволені значення тиску

Напірні головки типу «Storz» з номінальним тиском згідно з ДСТУ ISO 7268 [13]	Робочий тиск, МПа	Випробувальний тиск, МПа
PN16	1,6±0,05	2,4±0,05
PN 40	4,0±0,05	6,0±0,05

Методи випробування з визначення стійкості головки до дії робочого та випробувального тисків у проекті національного стандарту прийнято відповідно до вимог ДСТУ 3950-2000 [1] та AS 2419.4:2021 [12].

Сутність цих випробувань полягає в наступному. Головки з'єднують між собою, встановлюють на випробному столі, приєднують до джерела тиску, заповнюють водою до повного витиснення повітря і піднімають тиск до робочого. Швидкість збільшення тиску в зразках повинна бути постійною і такою, щоб одержати кінцеве значення тиску випробування протягом часу в діапазоні від 30 до 60 с для головок з умовним проходом до 50 мм включно. Для головок з умовним проходом більше 50 мм і менше 250 мм сягання кінцевого значення тиску повинно бути в діапазоні від 60 до 240 с. Величину тиску контролюють.

Головки під дією тиску витримують протягом (120 ± 5) с, якщо цей час особливо не обумовлений в нормативному документі на конкретний тип головки.

Тиск знижують до нуля, після чого з постійною швидкістю підвищують до випробного. Випробний тиск витримують протягом (120 ± 5) с.

Головки вважають такими, що витримали випробування, якщо не виявлено видимих пошкоджень, води (у вигляді крапель) на зовнішніх поверхнях головок та течі крізь з'єднання ущільнювальних кілець.

Наступним важливим методом щодо визначення герметичності з'єднання всмоктувальних головок є метод їх випробування на стійкість до дії вакууму. Враховуючи вимоги AS 2419.4:2021 [12], у пункті 6.1.1.3 проекту національного стандарту прийнято, що всмоктувальні головки повинні забезпечувати герметичність з'єднання під дією вакууму (розрідження) не менше ніж 0,095 МПа (за умови спорядження всмоктувальною прокладкою).

Методи випробування з визначення стійкості головки до дії робочого та випробувального тисків у проекті національного стандарту прийнято відповідно до вимог ДСТУ 3950-2000 [1] та AS 2419.4:2021 [12].

Сутність цих випробувань полягає в наступному. Головки з'єднують між собою, встановлюють на випробному столі, приєднують до джерела вакууму і зменшують тиск до 0,095 МПа з постійною швидкістю. Величину розрідження контролюють.

Головки під дією розрідження витримують протягом (300 ± 5) с, якщо цей час особливо не обумовлений в нормативному документі на конкретний тип головки.

Всмоктувальні головки вважають такими, що витримали випробування, якщо під час випробувань зменшення величини вакууму (не менше ніж 0,095 МПа), не перевищило 0,0030 МПа.

Не менш важливим методом випробувань є перевірка обертового зусилля для з'єднання (роз'єднання) з'єднувальних головок. У пункті 6.1.1.4 проекту національного стандарту, враховуючи вимоги AS 2419.4:2021 [12], прийнято, що обертове зусилля для з'єднання (роз'єднання) з'єднувальних головок типу «Storz», має бути в діапазоні, вказаному в таблиці 2 для відповідного діаметру умовного проходу.

Таблиця 2

Діапазон обертового зусилля для з'єднання (роз'єднання)

DN мм	Допустиме обертове зусилля, Н·м	
	Всмоктувальна прокладка	Напірна прокладка
25	1,5–3	Не потрібен
32	2–4	Не потрібен
38	3–6	Не потрібен
52	7–12	3–5
65	9–15	4–7
75	10–16	5–8
100	13–25	8–12
110	15–26	9–13
125	24–42	11–16
150	30–55	15–22

Метод випробування з перевірки обертового зусилля для з'єднання (роз'єднання) з'єднувальних головок у проекті національного стандарту прийнято відповідно до вимог ДСТУ 3950-2000 [1] та AS 2419.4:2021 [12].

Сутність цих випробувань полягає в наступному. Одна головка нерухомо закріплюється у пристрої для випробувань, друга – у тому ж пристрої таким чином, щоб мала змогу вільно обертатись навкруг своєї осі. Рухому головку приєднують до нерухомої і з'єднують між собою.

Далі за допомогою ключа головки з'єднують повністю. Зусилля з'єднання F, зазначене на рисунку 1 під час обертання головки, вимірюють

за допомогою пристрою для вимірювання зусилля з'єднання (роз'єднання) із застосуванням ключів та інших засобів, які забезпечують це вимірювання. За допомогою лінійки вимірювальної визначають плече прикладання зусилля d (плече сили), тобто найкоротшу відстань від вісі обертання до напрямку зусилля F . Схему прикладання зусилля наведено на рисунку 1.

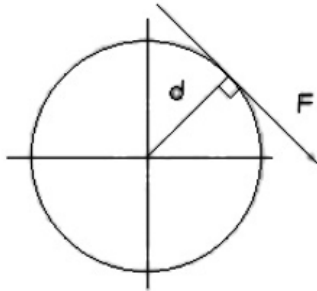


Рис. 1. Схема прикладання зусилля, необхідного для з'єднання головок

Зусилля з'єднання головок у Н реєструють за показанням пристрою для вимірювання зусилля з'єднання (роз'єднання).

Визначають момент сили за формулою (1).

$$M = F \cdot d, \quad (1)$$

де M – момент сили, Н·м;

F – сила (зусилля), Н

d – плече сили, м.

Аналогічно проводять випробування щодо визначення зусилля роз'єднання.

У пункті 6.1.1.10 проекту національного стандарту за аналогією з ДСТУ 3950-2000 [1] враховано, що з'єднувальні головки повинні бути стійкими до падіння з висоти $(1,80 \pm 0,05)$ м на бетонну поверхню.

Стосовно стійкості з'єднувальних головок до дії високої температури у пункті 6.1.1.11 проекту національного стандарту за аналогією з ДСТУ 3950-2000 [1] враховано, що з'єднувальні головки повинні бути стійкими до дії температури $(135 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Стосовно стійкості з'єднувальних головок до дії граничних температур експлуатації у пункті 6.1.1.12 проекту національного стандарту за аналогією з ДСТУ 3950-2000 [1] прийнято, що з'єднувальні головки повинні бути стійкими до дії граничних температур експлуатації, а саме від (мінус 40 ± 5) $^\circ\text{C}$ до $(40 \pm 5)^\circ\text{C}$. Такі граничні температури експлуатації відповідають району з помірним кліматом.

Такі методи випробувань, як «перевірка середнього терміну служби головки», «перевірка середнього терміну зберігання головки» та «перевірка

середнього наробітку на відмову» прийнято за аналогією з ДСТУ 3950-2000 [1].

Треба зазначити, що технічні вимоги і методи випробувань пожежних напірних рукавів було досліджено у звіті [3] та у публікаціях [14–23]. На підставі вказаних досліджень розроблено національний стандарт України ДСТУ 9069:2021 [2].

Як було сказано вище, у зв'язку із розробленням проекту національного стандарту ДСТУ XXXX:202X виникла необхідність у внесенні змін до національного стандарту України ДСТУ 9069:2021 [2].

В результаті проведених аналітичних досліджень в рамках вказаної науково-дослідної роботи встановлено основні зміни, які було враховано у проекті Зміни № 1 до національного стандарту України ДСТУ 9069:2021 [2], а саме:

– викладено у новій редакції таблицю 1 пункту 4.2 ДСТУ 9069:2021 [2] стосовно внутрішніх діаметрів рукавів та маси погонного метра рукава. Нижче наведено змінену таблицю 3 з основними параметрами та розмірами рукавів, які відповідають розширеній лінійці номінальних внутрішніх діаметрів з'єднувальних головок;

Таблиця 3

Основні параметри та розміри рукавів

Внутрішній діаметр рукава, мм	Маса погонного метра рукава, кг, не більше ніж		
	1 клас	2 клас	3 клас
25,0±1,0	0,18	0,20	0,23
32,0±1,0	0,20	0,25	0,29
38,0±1,0	0,24	0,29	0,35
51,0±1,0	0,35	0,42	0,50
52,0±1,0	0,36	0,43	0,51
65,0±1,0	0,44	0,54	0,65
66,0±1,0	0,45	0,55	0,66
75,0±1,0	0,53	0,64	0,77
77,0±1,5	0,55	0,66	0,79
100,0±2,0	0,84	0,98	1,21
110,0±2,0	0,92	1,08	1,33
125,0±2,0	–	–	1,70
150,0±2,0	–	–	1,80

Примітка. Рукави з внутрішніми діаметрами $(125,0 \pm 2,0)$ мм та $(150,0 \pm 2,0)$ мм відносяться виключно до рукавів 3-го класу

– викладено у новій редакції додаток Б ДСТУ 9069:2021 [2] стосовно розмірів вимірювального калібру для пожежних рукавів, параметри якого в новій таблиці відповідають розширеній лінійці номінальних внутрішніх діаметрів з'єднувальних головок.

На рисунку 2 наведено схему вимірювального калібру для пожежних рукавів. У таблиці 4 наведено оновлену таблицю з розмірами калібру.

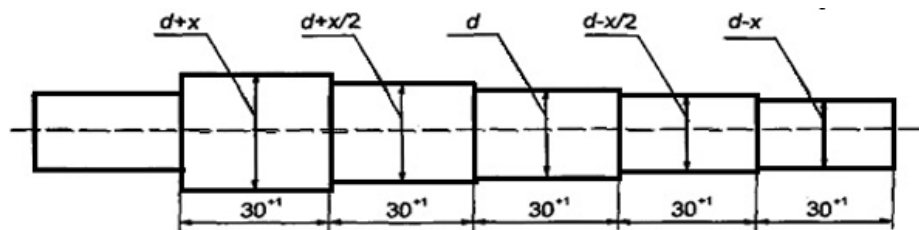


Рис. 2. Схема вимірювального калібру для пожежних рукавів

Таблиця 4

Основні параметри та розміри рукавів

Розміри калібру	Номінальний внутрішній діаметр рукава, D, мм												
	25	32	38	51	52	65	66	75	77	100	110	125	150
Номінальний діаметр, d, мм	25	32	38	51	52	65	66	75	77	100	110	125	150
Приріст діаметра, x, мм	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,5	2,0	2,0	2,0	2,0

Висновки

1. За результатами аналітичних досліджень науково обґрунтовано технічні вимоги і методи випробування з'єднувальних головок та пожежних напірних рукавів, які враховано в проєкті національного стандарту України ДСТУ ХХХХ:202Х *Промислово-жезвна техніка. Головки з'єднувальні типу «Storz»*. Загальні технічні вимоги та методи випробувань та проєкті зміни № 1 до ДСТУ 9069:2021 [2].

2. Розроблені нормативні документи будуть використані виробниками та споживачами зазначеної вище продукції, а також органами з оцінки відповідності під час підтвердження її якості, що сприятиме подальшому впровадженню у практичну роботу пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України нових зразків з'єднувальних головок та пожежних рукавів.

Список літератури:

1. ДСТУ 3950-2000. Техніка пожежна. Головки з'єднувальні для пожежного обладнання. Загальні технічні умови. Введ. 2001-01-01. К.: Держспоживстандарт України, 2001. 33 с.
2. ДСТУ 9069:2021. Протипожежна техніка. Рукави пожежні плоскоскладані для пожежно-рятувальних автомобілів. Загальні вимоги та методи випробування. Введ. 2021-08-01. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2021. 27 с.
3. Провести пошукові дослідження та визначити шляхи удосконалення технічного рівня, ефективності застосування протипожежної, аварійно-рятувальної та іншої спеціальної техніки і обладнання: звіт про НДР (заключний). / кер. О.П. Борис. Київ: УкрНДНЦ, 2016. 784 с.
4. DIN 14333:2022-12 Hose couplings Storz System PN 16 for delivery and suction. Document published on: 2022-12-01. Berlin: German Institute for Standardization, 2022. 24 p.
5. DIN 14334:2020-12 Solid couplings Storz System PN 16 for delivery and suction. Document published on: 2020-12-01 – Berlin: German Institute for Standardization, 2022. 19 p.
6. DIN 14335-2022 – 12 Blank cap couplings Storz System PN 16 for delivery and suction. Document published on: 2022-12-01 – Berlin: German Institute for Standardization, 2022. 21 p.
7. PN-M-51024:2015-07 Sprzęt pożarniczy – Pokrywy nasad. Dokument zostaje opublikowany: 2015-07-24. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2022. 9 s.
8. PN-M-51031:2015-07 Sprzęt pożarniczy – Łączniki do węży pożarniczych. Dokument zostaje opublikowany: 2015-07-27. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2022. 20 s.
9. PN-M-51038:2015-08 Sprzęt pożarniczy – Nasady. Dokument zostaje opublikowany: 2015-08-19. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2022. 18 s.
10. PN-M-51042:2015-07 Sprzęt pożarniczy – Przełączniki. Dokument zostaje opublikowany: 2015-07-27. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2015. 18 s.
11. PN-M-51046:2015-07 Sprzęt pożarniczy – Uszczelki do łączników, przełączników, nasad i pokryw nasad. Dokument zostaje opublikowany: 2015-07-27. Warszawa: Polski Komitet Normalizacyjny, 2015. 12 s.
12. AS 2419.4:2021 Fire hydrant installations Storz fittings for firefighting purposes. Document published on: 2021-04-09. Sydney: Standards Australia Committees. 2015. 74 p.
13. ДСТУ ISO 7268:2009 (ISO 7268:1983, IDT). Трубопроводи та елементи трубопроводів. Визначення номінального тиску. Введ. 2011-07-01. К.: Держспоживстандарт України, 2011. 5 с.

14. Про удосконалення нормативної бази щодо технічних вимог та методів випробувань до напірних пожежних рукавів / В.В. Присяжнюк, С.В. Семичаєвський, М.Л. Якіменко, М.В. Осадчук, В.В. Свірський, О.В. Мілютін// *Комунальне господарство міст*, 2020, том 1, випуск 154. С. 312–317.

15. Щодо видів, номенклатури та основних параметрів напірних пожежних рукавів для пожежно-рятувальної техніки / В.В. Присяжнюк, С.В. Семичаєвський, М.Л. Якіменко, М.В. Осадчук, В.В. Свірський, О.В. Мілютін// *Комунальне господарство міст*, 2020, том 1, випуск 154. С. 318–323.

16. Аналіз конструктивного виконання та основних технічних вимог до пожежних плоскоскладаних рукавів для пожежно-рятувальної техніки / В.В. Присяжнюк, С.В. Семичаєвський, М.Л. Якіменко, М.В. Осадчук, В.В. Свірський, О.В. Мілютін// *Комунальне господарство міст*, 2020, том 1, випуск 154. С. 324–327.

17. Аналіз технічних вимог до напірних пожежних рукавів, що застосовуються разом із пожежно-рятувальною технікою / В.В. Присяжнюк, С.В. Семичаєвський, М.Л. Якіменко, М.В. Осадчук, В.В. Свірський, О.В. Мілютін// *Комунальне господарство міст*, 2020, том 3, випуск 156. С. 212–216.

18. Щодо експериментального обґрунтування показників якості напірних пожежних плоскоскладаних рукавів для пожежно-рятувальної техніки та методів їх оцінки / В.В. Присяжнюк, С.В. Семичаєвський, М.Л. Якіменко, М.В. Осадчук, В.В. Свірський, О.В. Мілютін// *Комунальне господарство міст*, 2020, том 3, випуск 156. С. 217–221;

19 Аналіз європейських підходів щодо технічних вимог та методів випробувань пожежних плоскоскладаних рукавів для пожежно-рятувальних автомобілів / Віталій Присяжнюк, Сергій Семичаєвський, Михайло Якіменко, Максим Осадчук// *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 2020, № 1(9). С. 76–83.

20. Аналіз видів, номенклатури та основних параметрів напірних пожежних рукавів для пожежно-рятувальної техніки/ Віталій Присяжнюк, Сергій Семичаєвський, Михайло Якіменко, Максим Осадчук, Віталій Свірський, Олександр Мілютін // *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. С. 101–103.

21. Удосконалення нормативної бази щодо технічних вимог та методів випробувань до напірних пожежних рукавів / Віталій Присяжнюк, Сергій Семичаєвський, Михайло Якіменко, Максим Осадчук, Віталій Свірський, Олександр Мілютін // *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. С. 103–05.

22. Щодо конструктивного виконання та основних технічних вимог до пожежних плоскоскладаних рукавів для пожежно-рятувальної техніки / Віталій Присяжнюк, Сергій Семичаєвський, Михайло Якіменко, Максим Осадчук, Віталій Свірський, Олександр Мілютін // *Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. С. 105–107.

23. Щодо експериментального обґрунтування показників якості напірних пожежних плоскоскладаних рукавів для пожежно-рятувальної техніки та методів їх оцінки / Присяжнюк В.В., Семичаєвський С.В., Якіменко М.Л., Осадчук М.В., Свірський В.В. // *Надзвичайні ситуації: безпека та захист: Матеріали X Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю*. Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2020. С. 84–86.

Semychayevsky S.V., Prisyajnyuk V.V., Osadchuk M.V., Yakimenko M.L., Svirskyi V.V.

JUSTIFICATION OF TECHNICAL REQUIREMENTS AND TESTING METHODS OF CONNECTING FIRE HOSE COUPLING AND FIRE PRESSURE HOSES

In this publication, the relevance of the issue of improving the regulatory framework related to fire hose coupling, namely the development of a new national standard of Ukraine, which concerns fire hose coupling for fire-fighting equipment of the «Storz» type, which is necessary for the implementation of the requirements of the Technical Regulations of Construction Products, buildings and structures. It is also indicated the expediency of developing the corresponding project of amendment № 1 to the national standard DSTU 9069:2021 in force in Ukraine.

Attention is focused on the fact that there is currently no single European standard for fire hose couplings and fire hoses. Each country uses one or another type of fire hose couplings and corresponding fire hoses and has its own national standard. It is noted that the largest amount of fire-rescue equipment received as humanitarian aid by the fire-rescue units of the State Emergency Service of Ukraine is equipped with fire hoses with «Storz» fire hose couplings, which are used by at least ten countries of the world, namely Poland, Germany, France, Switzerland, Sweden, the Netherlands, Italy, Great Britain, the USA and Australia.

Information on the results of previously conducted similar scientific studies is presented and their shortcomings are identified.

The results of the substantiation of the technical requirements and test methods of fire hose coupling of the «Storz» type and fire pressure hoses are given.

It is noted that, as a result of the analytical studies, the test methods provided for in the project of the national standard have been established, namely: checking the appearance; measurement of fire hose coupling sizes; determination of the resistance of the fire hose coupling to the action of working and test pressure; vacuum resistance test; testing for resistance to falling from a height; high temperature resistance test; checking the rotational force for connecting (disconnecting) the fire hose couplings; checking the average service life of the fire hose couplings; checking the average shelf life of the fire hose couplings; checking the average earnings for rejection; testing for resistance to extreme operating temperatures.

The technical characteristics are given and the test methods of fire hose couplings of the «Storz» type are described.

The main changes were established, which were taken into account in the project of Amendments № 1 to the national standard of Ukraine DSTU 9069:2021.

Key words: *connecting fire hose coupling of the «Storz» type, fire hoses, justification, test methods, technical requirements.*

UDC 621.382

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/33>**Burkovskiy Ya. Yu.**

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Zinkovsky Yu. F.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

GALLIUM NITRIDE SEMICONDUCTORS: TRANSFORMING THE TELECOMMUNICATION SYSTEMS POWER SUPPLY PERFORMANCE

This article presents a detailed review of the advancements in Gallium Nitride (GaN) technology, particularly emphasizing its transformative role in the development of power converter technology. The review starts by laying out the basic yet vital properties of GaN, such as its high electron mobility, wider bandgap, and superior thermal conductivity. These characteristics enable GaN to surpass the performance of traditional silicon-based devices, especially in applications that demand high-frequency operation. This introductory section aims to provide a clear, easily understandable explanation of why GaN stands out in the semiconductor world.

Building on this foundation, the article shifts its focus to the specific role of GaN in enhancing power converters, a critical component in various electronic devices. Here, it details the tangible improvements that GaN brings to the table, including increased efficiency, reduction in size, and better thermal management. The discussion centers around how these enhancements not only improve the performance of power converters but also contribute to the overall efficiency and compactness of electronic systems.

Moreover, the review explores the wider implications of the shift towards GaN in the realm of power electronics. It contemplates a future where efficiency and performance standards in electronic devices are redefined, thanks to the integration of GaN technology.

Finally, the article provides a comprehensive overview of both the current impact and the future potential of GaN semiconductor technology in the field of telecommunication power converters. It brings together various aspects of GaN technology—from its fundamental properties to its practical applications and future possibilities—offering a complete picture of how GaN is shaping the future of power electronics. This comprehensive approach makes the article an informative read for anyone interested in the latest trends and future directions in semiconductor technology.

Key words: Gallium Nitride (GaN), power converters, wide bandgap semiconductors, high efficiency.

Problem Statement. Silicon-based MOSFET devices are currently the standard in power switches for various power applications, including AC/DC and DC/DC supplies, and motor controls, covering a broad range of power levels from mere tens of watts to several thousands of watts. These devices have undergone continuous enhancements in critical parameters such as on-resistance $R_{DS(ON)}$, voltage ratings, switching speeds, packaging, and other features. However, the pace of improvements in silicon MOSFETs has reached a plateau, largely because their performance is now approaching the theoretical maximum, as dictated by the fundamental physics inherent to these materials and processes. Nevertheless, the recent advancements in the telecommunica-

tion power systems domain have been driven by the need for low power consumption, high efficiency, and power density.

This situation underscores the need to explore alternative wide bandgap materials like gallium nitride GaN and silicon carbide (SiC) to push the boundaries of power switch technology further.

Gallium Nitride (GaN), a wide bandgap semiconductor, has emerged as a highly effective solution for high-power transistors, especially at elevated temperatures. Initially gaining prominence in the 1990s for its application in blue light-emitting diodes (LEDs), GaN's use has since expanded to encompass semiconductor power devices, RF components, lasers, photonics, and sensor technology, showcasing its versa-

tile potential. GaN's superior properties have made it a material of choice in these areas, underscoring its broad applicability [1].

The development of enhancement-mode GaN transistors, known as GaN FETs, in 2006 marked a pivotal advancement. These transistors are produced by growing a GaN layer on an Aluminum Nitride (AlN) buffer layer atop standard silicon wafers. This process, achieved through metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD), aligns GaN transistor fabrication with the existing silicon component manufacturing infrastructure. This compatibility maintains cost-efficiency and eases integration due to the enhanced transistor performance, bridging the gap between new semiconductor materials and traditional manufacturing methods (Fig. 1) [2].

Analysis of recent research and publications. The usage Gallium Nitride (GaN) transistors has directed a new era in the telecommunication power supply systems. Characterized by their high efficiency and power density, GaN transistors are increasingly recognized as pivotal components in the evolution of modern power supplies.

The earlier research conducted by Saltanovs and Krainyukov (2018) marked a significant stride in the application of GaN transistors. Their study focused on the utilization of eGaN EPC2034 transistors in wireless power transmission systems, emphasizing the transistors' exceptional frequency properties and compactness. The creation of power inverter hybrid modules using these transistors and their subsequent efficiency assessment, particularly under direct liquid cooling with silicone oil, underscored the potential of GaN transistors in enhancing wireless power transmission efficiency [3].

Further advancing the understanding of GaN transistors, Lazarević et al. (2019) demonstrated a high-

efficiency, high-bandwidth power supply system for linear power amplifiers. This system, leveraging the capabilities of GaN transistors, operated at a 1-MHz switching frequency and achieved efficiencies beyond 94% [4]. The study not only highlighted the efficiency benefits of GaN transistors but also their role in achieving fast switching speeds, thus reinforcing the importance of wide bandgap devices in power electronics.

In the context of power supply efficiency and density, Persson's research provided a comparative analysis of 600 V GaN transistors with high-performance Si FETs and SiC Schottky diodes. This comparison revealed how GaN technology could propel power supplies to new heights of efficiency and density, thereby setting a new benchmark in the field [5].

Lastly, the radiation hardness of GaN transistor-based power supplies was explored by Devine and Gonzalez (2020). Their research, focusing on the board-level testing of these power supplies in extreme radiation environments, confirmed the durability and consistent performance of GaN transistors under such conditions. This finding is particularly relevant for applications in compacted and harsh environments of special-use telecommunication devices, where robustness is critical [6].

Task statement. This article provides an overview of the advancements and applications of Gallium Nitride (GaN) technology in the telecommunications sector. It begins by elucidating the unique attributes of GaN, such as its high electron mobility and wide bandgap, which make it particularly suitable for high-frequency and high-power applications. This section aims to offer a foundational understanding of GaN's advantages over traditional silicon-based technologies.

The core of the article delves into the current applications of GaN in the telecommunications industry.

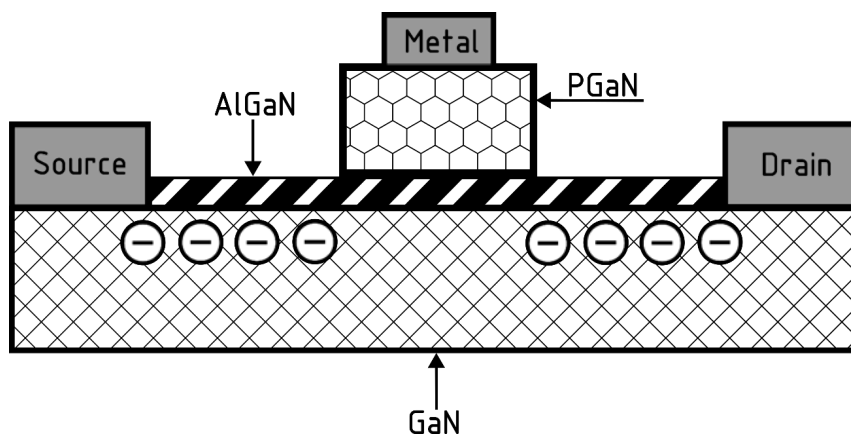


Fig. 1. GaN on an Aluminum FET structure

It highlights its significant role in power converters and RF amplifiers, which are integral to the efficiency and functionality of telecommunication systems. This segment emphasizes the practical implementations of GaN and the improvements they bring to the sector, such as enhanced signal quality, reduced power loss, and greater system reliability.

Further, the article explores the prospects of GaN in telecommunications. It presents an analysis of ongoing research, emerging trends, and potential innovative applications that could revolutionize the industry. This part of the article is particularly focused on how GaN technology might evolve and influence future telecommunications infrastructure, including 5G networks and beyond.

Lastly, the article touches upon the economic aspects of transitioning to GaN technology in telecommunications. It discusses the cost implications, market trends, and potential returns on investment, offering a comprehensive perspective on the economic impact of adopting GaN technology.

Outline of the main material of the study.

A critical property of semiconductor materials is their bandgap, which determines their electrical conductivity. GaN's bandgap is 3.4 eV, significantly wider than silicon's 1.12 eV (Table 1). This attribute allows GaN to tolerate higher voltages and temperatures compared to silicon MOSFETs, making it ideal for high-power and high-frequency devices, as well as in optoelectronics, where these properties are crucial.

Table 1

Semiconductor material parameters

Material parameters			
Parameters	Si	GaN	SiC
Bandgap E_g , eV	1.12	3.39	3.26
Critical Field E_{crit} , MV/cm	0.23	3.3	2.2
Electron Mobility μ_n , $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$	1400	1500	950
Permittivity, ϵ_r	11.8	9	9.7
Thermal Conductivity λ , $\text{W}/\text{cm}\cdot\text{K}$	1.5	1.3	3.8

GaN's efficiency in electron conduction and resilience to high electric fields surpasses silicon in terms of speed, temperature tolerance, and power handling. Consequently, GaN is increasingly supplanting silicon in various power conversion and RF applications. This transition is a testament to GaN's superior performance capabilities in these critical areas.

As can be seen from Figure 2, the theoretical on-resistance per unit area ($R_{DS(ON)}$) for 1mm^2 power semiconductor devices is plotted against the blocking voltage for three different materials: Silicon (Si), Silicon Carbide (SiC), and Gallium Nitride (GaN). This graph provides a clear comparison of the materials'

performance with respect to power efficiency at varying voltages.

Si, the traditional material for power devices, exhibits a steep increase in on-resistance with rising voltage, indicating higher power losses at elevated voltages. This makes Si less ideal for high-voltage applications. In contrast, SiC and GaN show a much more gradual increase in on-resistance with voltage. Their superior performance at high voltages is evident, which suggests they are more efficient, leading to lower energy losses.

The shallower slopes for SiC and GaN compared to Si's steeper slope highlight their better suitability for applications where voltage and on-state resistance requirements are particularly high. This makes them attractive for use in modern power systems where efficiency is a critical parameter, such as electric vehicles, communication systems, server power supplies, etc.

GaN's advantages extend beyond its electrical properties. Its fast-switching speed permits higher switching frequencies, leading to smaller passive component sizes and, in some cases, eliminating the need for mechanical heatsinking. This contributes to a significant reduction in size and weight in the final product when utilizing GaN FETs and ICs. The high switching performance and miniaturization offered by GaN result in unprecedented power density and efficiency across numerous applications, revolutionizing product design.

An important aspect of device operation is heat dissipation. GaN FETs demonstrate exceptional thermal performance, even with a smaller FET area compared to equivalent $R_{DS(ON)}$ MOSFETs. For chip-scale GaN transistors, thermal resistance to the case ($R_{\theta JC}$) is lower than that of silicon devices, ensuring efficient thermal conduction [3]. This improved thermal management is pivotal in maintaining device reliability and performance.

The GaN-based switching component ecosystem has evolved, comprising a broad array of devices, sophisticated modeling and simulation tools, specialized drivers, comprehensive application support, and extensive field experience. These developments propel GaN devices into performance realms beyond current and foreseeable MOSFET capabilities, marking a significant technological evolution.

However, the advanced capabilities of GaN devices require careful management of their operational characteristics, such as precise control over turn-on/off dynamics, gate drive requirements, voltage and current slew rates, current levels, noise sources and coupling, and layout considerations [7]. Therefore, integrating GaN technology in pow-

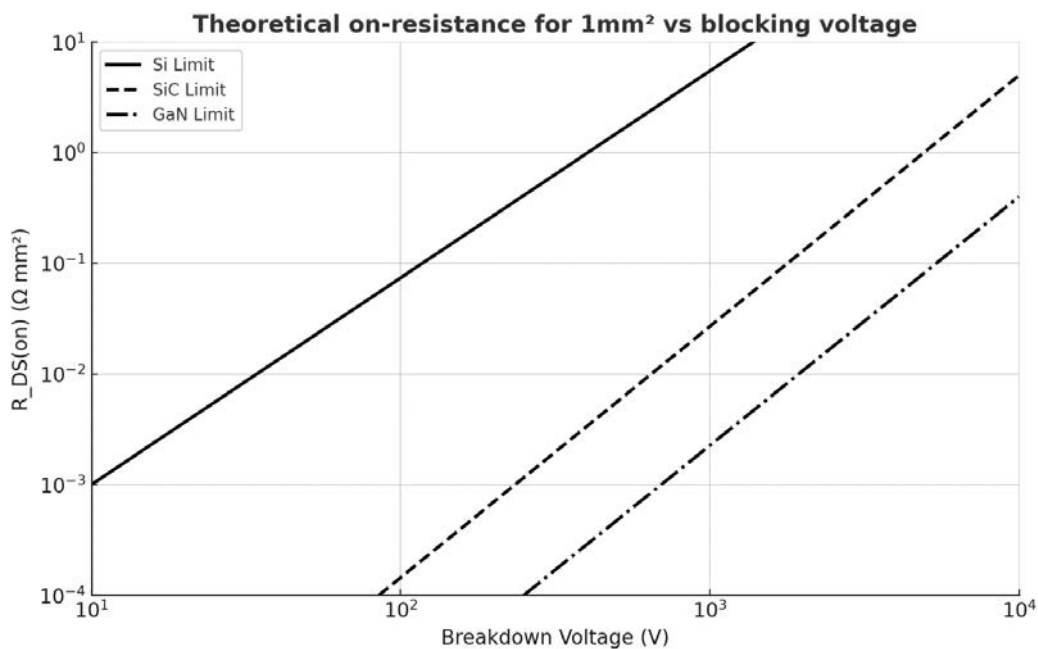


Fig. 2. Theoretical on-resistance for 1mm² vs blocking voltage

er-switching applications necessitates a nuanced, detailed engineering approach to maximize its potential while addressing associated challenges. This careful integration strategy is essential for harnessing GaN's full capabilities in various applications.

Conclusions. This article demonstrates the transformative impact of Gallium Nitride (GaN) technology in enhancing telecommunication power supplies. GaN's superior characteristics, such as high electron mobility, wide bandgap, and excellent thermal conductivity, make it a significant improvement over traditional silicon semiconductors, especially in high-frequency applications. These properties not only lead to increased efficiency but also enable a reduction in the size and improved thermal management of power converters and RF amplifiers in telecommunication systems.

The practical benefits of GaN are evident in real-world implementations, which showcase substantial improvements in the performance and compactness of

power supply systems. Additionally, the compatibility of GaN with existing silicon fabrication processes facilitates a smoother transition to this advanced technology, balancing enhanced performance with cost-effectiveness. This aspect is crucial for its wider adoption in the industry.

Looking to the future, GaN is poised to play a pivotal role in the evolution of electronic devices, promising greater energy efficiency and higher performance. The ongoing research and development in this field suggest that GaN technology will not only revolutionize telecommunications but also find applications in various other sectors.

In summary, GaN semiconductors represent a major technological advancement, offering unprecedented improvements in the efficiency and capabilities of electronic devices. This shift from silicon to GaN is a key milestone in semiconductor technology, paving the way for more innovative and efficient electronic solutions in the future.

Bibliography:

1. GaN Transistors for Efficient Power Conversion / J. Strydom et al. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2019. 384 p.
2. Lidow A. GaN Power Devices and Applications. Efficient Power Conversion Corporation, 2021.
3. Saltanovs R., Krainyukov A. Employment of SiC MOSFETS and GaN-Transistors for Wireless Power Transmission Systems. Reliability and Statistics in Transportation and Communication, Riga, 17–20 October 2018. Switzerland, 2018. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-12450-2_28 (date of access: 26.01.2024).
4. High-Efficiency High-Bandwidth Four-Quadrant Fully Digitally Controlled GaN-Based Tracking Power Supply System for Linear Power Amplifiers / V. Z. Lazarevic et al. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2019. Vol. 7, no. 2. P. 664–678. URL: <https://doi.org/10.1109/jestpe.2018.2884959> (date of access: 26.01.2024).

5. Persson E. How 600 V GaN Transistors Improve Power Supply Efficiency and Density. Tonbridge : Power Electronics Europe, 2015. 4 p. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-How_600V_GaN_transistors_improve_power_supply_efficiency_and_Density-ART-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462533600a40153569256d12b5a (date of access: 26.01.2024).
6. Devine J., Gonzalez E. C. Proton irradiation of GaN transistor based power supply operating in the linear region. 2020 20th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), Toulouse, France, 19 October–20 November 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/radecs50773.2020.9857693> (date of access: 26.01.2024).
7. Erickson R. W., Maksimović D. Fundamentals of Power Electronics. Springer, 2020. 1117 p.

Бурковський Я.Ю., Зіньковський Ю.Ф. ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ НІТРИДУ ГАЛІЮ (GAN): ТРАНСФОРМАЦІЯ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

У цій статті розглядаються досягнення у сфері застосування широкозонних напівпровідників таких як нітрид галію (GaN) та його вплив на перетворювачі електричної енергії у системах живлення телекомунікаційного обладнання. Огляд починається з розгляду основних, але найважливіших властивостей GaN, таких як його висока рухливість електронів, ширша заборонена зона та висока теплопровідність, які перевершують такі у звичайних кремнієвих напівпровідників. Цей вступний розділ має на меті надати чітке та зрозуміле пояснення того, чому GaN виділяється у світі напівпровідників. Обговорення зосереджено навколо того, як ці вдосконалення не тільки покращують коефіцієнт корисної дії перетворювачів енергії, але й сприяють загальному вдосконаленню та зменшенню габаритів електронних систем. Як наслідок, використання GaN підвищує ефективність роботи силових елементів у високочастотних перетворювачах у порівнянні з кремнієвими аналогами. Стаття в першу чергу зосереджена на ролі широкозонних напівпровідників у вдосконаленні перетворювачів енергії, а саме їх КПД, розміру та температурних режимів. Огляд представляє поточний і потенційний майбутній вплив застосування широкозонних напівпровідників, таких як нітрид галію та карбід кремнію, на ефективність, габарити та тепловиділення високочастотних перетворювачів енергії. Нарешті, стаття містить вичерпний огляд як поточного впливу, так і майбутнього потенціалу технології GaN у сфері перетворювачів енергії для телекомунікаційних систем. Це дослідження розглядає різні аспекти технології GaN – від її фундаментальних властивостей до практичного застосування та майбутніх можливостей – оглядаючи повну картину того, як GaN формує майбутнє силової електроніки. Цей комплексний підхід робить статтю інформативною для тих, хто цікавиться останніми тенденціями та майбутніми напрямками в напівпровідникових технологіях.

Ключові слова: нітрид галію (GaN), перетворювачі потужності, широкозонні напівпровідники, висока ефективність.

Когдась М.Г.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Притчин С.Е.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Палагін В.А.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Оксанич А.П.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Драгобецький В.В.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Ломонос А.І.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ МЕХАНІЗМУ УТВОРЕННЯ ПОРУВАТОГО ШАРУ P-SI

У роботі було отримано модель утворення поруватих шарів у слабо легovanому кремнії (p-Si) та сильно легovanому кремнії (n-Si) під час анодного травлення. Застосовуючи комп'ютерне моделювання на дво- та тривимірних сітках, було досліджено вплив параметрів, таких як густина струму, концентрації HF і рівня легування, розміру пор та ймовірність генерації дірок, на морфологію утворених пор. Результати показали, що у p-Si ріст пор відбувається переважно в тонкому передньому шарі через дифузійно-обмежений процес, що призводить до градієнта поруватості. З іншого боку, у n-Si механізм утворення пор схожий на механізм у p-Si через ефекти фокусування електричних полів на лініях пор. При високих густинах струму відбувається утворення великих пор, які формуються під впливом розмірного квантування в кристалічних наночастинках. Розбіжності з експериментальними даними пояснюються ефектами, такими як утворення великих пор в результаті взаємодії із старими порами, а також впливом розмірного квантування, яке може пригнічувати травлення кремнієвих міжпоруватих перегородок. Дослідження вказують на важливі аспекти механізмів утворення пор в різних типах кремнію під час анодного травлення, що може бути корисним для виробництва напівпровідникових пристроїв з макро- та мікропоруватими структурами. Модель дозволяє проводити генерацію пор, що дозволяє розміщувати отвори на будь-якій глибині поруватого шару Si, і активна поверхня більше не обмежується фронтальним шаром. Діаметр пор збільшується до тих пір, поки квантове утримання в кристалічних наночастинках не стане значним. Одночасний ефект генерації пор і квантування розмірів призводить до вирівнювання профілю пористості. Морфологія змодельованих структур на основі вдосконаленої моделі ДЛА близька до експериментальних нанопоруватих структур. Поєднання теплогенерації та квантової локалізації призводить до різних профілів поруватості в напрямку глибини. Розраховані фрактальні розміри змодельованих нанопоруватих структур варіюються від 0,1 до 3, оскільки розмір структури варіюється від 0,3 до 1 нм.

Ключові слова: анодне травлення, кремній, пори, модель, легування.

Постановка проблеми. Незважаючи на те, що експериментально поруватий кремній отримують уже давно, тривалий час було незрозуміло, чому розчинення кремнію відбувається переважно на кінцях пор, а не однорідно по поверхні. У низці робіт робилися спроби пояснити переважання утворення пір над електрополіруванням осажден-

ням пасивуючих, нерозчинних силікатів на стінки пір, формуванням збіднених шарів, що концентрують потенціал на кінцях пір, а також утворенням плівки H₂. Однак на сьогодні не існує моделі, що з єдиних позицій пояснює весь комплекс експериментальних даних щодо утворення поруватого кремнію і, зокрема, зв'язку між умовами

експерименту та морфологічними характеристиками одержуваного кремнію за різних напруг, освітленості, концентрації HF тощо [1, 2].

Розміри пор, що поцятковують кремнієвий електрод у процесі анодного травлення в плавиковій кислоті, перекривають діапазон у чотири порядки (від 2 нм до 20 мкм). Для пояснення різноманітності форм і розмірів пір були запропоновані різні моделі [3]. Утворення найдрібніших поруватих структур інтерпретувалося як самоузгоджене явище, зумовлене збіднінням діркового заряду внаслідок розмірного квантування в поруватій структурі. Однак ці моделі незастосовні на розмірах, що перевищують 10 нм, коли ефекти розмірного квантування нехтувано малі. Отже, різні механізми відповідають за утворення мезо- і макропор. У роботі [4] було показано, що в основі утворення макропор також лежать самоузгоджені явища. Однак, на відміну від випадку збіднення внаслідок розмірного квантування, збіднення носіями заряду на стінках пор пояснювалося тим, що розглядався напівпровідник n-типу. Істотна умова в електрохімії утворення макропор – це рівновага між іонною дифузією в електроліті та доставкою заряду з кремнієвого електрода на кінці пор. Ця умова відсутня при утворенні мікропор. Рівновага настає за характерної величини густини струму, що діє на всіх днах пор під час анодизації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У моделях, розглянутих у роботах [4], покладених в основу моделювання утворення POR-SI, як домінуючий механізм доставки дірок на поверхню кремнієвого анода розглядали дифузію. При цьому ігнорувалися умови анодного травлення, що визначають морфологію структури поруватого шару: рівень легування кремнієвої підкладки, щільність анодного струму, концентрація розчину HF. При розумінні важливої ролі електричного поля в транспорті дірок у процесі анодного травлення, на поточному етапі неможливо побудувати алгоритм комп'ютерного моделювання, що забезпечує точний розрахунок розподілу об'ємного заряду та електричного поля в кремнії та електроліті. Тому при створенні обчислювального алгоритму виникає необхідність використовувати спрощену картину цього розподілу. Так у роботі [9] було прийнято наближення, згідно з яким силові лінії електричного поля фокусуються на кінцях пір, а поле діє на дірку починаючи з фіксованої відстані до найближчого кінця пори. У роботі [6] побічно враховувався ефект окислення кремнію при підвищенні щільності анодного струму, що

призводить до збільшення діаметра пор. Також робилося врахування залежності ймовірності розчинення при досягненні діркою кордону розділу від концентрації HF у розчині електроліту [7]. Однак результати моделювання в зазначених випадках навіть візуально відрізняються від даних просвічувальної електронної мікроскопії (ПЕМ). Тому відомі способи модифікації моделі дифузійно лімітованої агрегації (ДЛА), що застосовувалися з метою врахування не дифузійних механізмів утворення POR-SI, не можна вважати цілком вдалими.

Метою роботи є дослідження методу моделювання процесу утворення поруватого кремнію під час анодного травлення, що враховує рівень легування підкладки r-типу, густину анодного струму, концентрацію і температуру розчину HF в електроліті, що підвищить якість одержуваного поруватого кремнію.

Виклад основного матеріалу. Припустимо, що морфологія поруватої структури визначається самоузгодженою кореляцією між потенційним і геометричним рельєфом кремнієвого анода. Ця кореляція актуальна в сильно легуваному матеріалі, де можуть виникати області просторового заряду високої щільності та сильні локальні електричні поля. У принципі, в такій постановці відповідь на питання про динаміку формування поруватої структури можна отримати в рамках розв'язання першої та другої задач електродинаміки для розглянутої системи. Однак це потребувало б величезних витрат пам'яті та машинного часу. Тому, замість точного розрахунку просторового розподілу електричних полів і струмів, зробимо акцент на таких ефектах:

– на кінцях (днах) пор електричне поле підвищується через ефект концентрації силових ліній на ділянках з малим радіусом кривизни. Відповідно густина струму на дні пори підвищується порівняно із середньою за об'ємом;

– на дні пори виникає ефект селективного травлення на мікроскопічних нерівностях поверхні кремнієвого анода. Оскільки дно пори є ділянкою підвищеної щільності анодного струму, то в цій ділянці з боку електроліту виникає збіднення заряду іонів. Дірка, опинившись на поверхні розділу, до вступу в електрохімічну реакцію з іоном отримує додаткову можливість здійснити дрейф у напрямку, що визначається зовнішньою напругою. Тому височини на поверхні кремнієвого анода відіграють роль ефективних стоків для дірок і стравлюються насамперед. З іншого боку, підвищення густини струму призводить до

насичення швидкості розчинення, зумовленого тим, що продукти реакції не встигають дифундувати з локальних заглиблень на поверхні кремнію в об'єм електроліту.

Таким чином, область інтенсивного розчинення зміщується з поглиблених ділянок на височини і відбувається саморегульоване вирівнювання розподілу густини струму і рельєфу на доньях пор.

У слабо легovanому кристалі ($p < 10^{16} \text{ см}^{-3}$) густина просторового заряду і напруженість локальних електричних полів невеликі. Припустимо, що в цих напівпровідниках ефекти фокусування силових ліній на днах пір і потенційного рельєфу проявляються слабо. Тоді в цих кристалах домінуючим механізмом утворення пор є дифузія, яка добре описується в моделі ДЛА. Однак проведемо модифікацію даної моделі ДЛА, ввівши такі параметри як врахування термічної генерації та рекомбінації дірок, а в нанокристалах – ефект розмірного квантування. Зазначимо, що механізм термічної генерації раніше не брали до розгляду не тільки в комп'ютерному моделюванні, а й під час формулювання фізичної моделі процесу анодного травлення. Оскільки поблизу поверхні кремнієвого анода формується ОПЗ, усередині якої термічна генерація дірок пригнічується внаслідок повної іонізації акцепторних домішок. У слабо легovanому кремнії за низької густини анодного струму густина об'ємного заряду поблизу поверхні невелика, і тому термічною генерацією/рекомбінацією носіїв заряду не можна нехтувати. Розмірне квантування, як відомо, призводить до розширення забороненої зони. У результаті між наночастинками та об'ємним матеріалом виникає енергетичний бар'єр, що перешкоджає проникненню дірок у глиб наночастинок.

Комп'ютерне моделювання утворення пор у p-Si проводиться на двовимірній (160x160) і тривимірній (160x160x80) сітках. Крок сітки відповідає середній міжатомній відстані.

Кожна позиція на сітці позначена як комірка. Крок сітки відповідає реальному розміру поверхневих зарядових індукцій. Обчислювальний алгоритм проілюстровано на рис. 2.

N дірок випадковим чином переносяться сіткою, перестрибуючи через відстань, що дорівнює середньому вільному пробігу. Як тільки дірка знаходиться в радіусі RD від найближчої вершини пори, починається дрейф у напрямку цієї вершини. RD дорівнює радіусу Дебая і виражається в комірках сітки. Після того, як отвір досягає точки на межі поділу фаз, аналіз кривизни межі поділу фаз

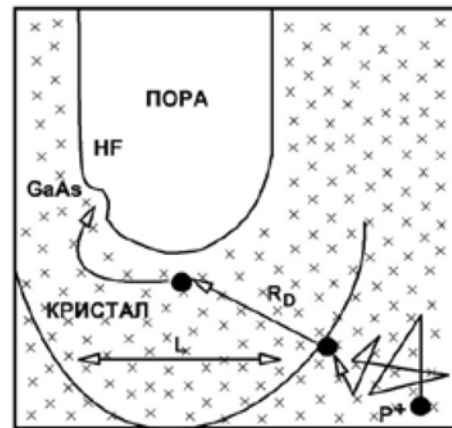


Рис. 1. Ілюстрація обчислювального алгоритму для p1-Si

проводиться в межах інтервалу L від цієї точки. Розчинення відбувається в найбільш помітному виступі на цьому інтервалі. Для того, щоб зв'язати параметр L з параметрами експерименту, використовуємо емпіричне співвідношення [8]:

$$j_{PS} = C_C^{3/2} \exp(-E_A / kT) \quad (1)$$

де критична густина струму j_{PS} і концентрація HF c виражені в mA/cm^2 і %, відповідно, $C = 3300 \text{ mA}/\text{cm}^2 \text{ ваг.}\%^{-3/2}$, $E_A = 343 \text{ меВ}$. Можна оцінити приблизно середній діаметр d пор, зробивши такі припущення: а – густина струму дорівнює j_{PS} на днах пор і 0 поза ними; б – усі пори мають однаковий діаметр; с – кількість пор на поверхні не змінюється з часом.

Тоді ми отримаємо:

$$j = N_s j_{PS} \pi d^2 / 4 \quad (2)$$

де j – середня густина струму на поверхні шару Si, N_s – поверхнева густина пор.

З рівняння (2) впливає середній діаметр пор:

$$d = \sqrt{\frac{4j}{\pi C_C^{3/2} N_s} \exp(-E_A / kT)} \quad (3)$$

Параметр L (з кроком сітки) дорівнює d, а потім Рівняння (3).

N_s залежить від довжини Дебая в Si та початкових умов анодування. У слаболегovanому кристалі ($P < 10^{16} \text{ см}^{-3}$) густина просторового заряду та локальна електрична напруженість є низькими. Тому вплив потенційного рельєфу на морфологію поруватих структур у p-Si очікувано буде незначним. З цієї причини запропоновані домінуючі механізми пороутворення у формуванні легкованних POR-SI-Si – дифузія, термічна дифузія, теплова генерація та рекомбінація дірок у нанокристалітах і ефект квантового зв'язку. Квантовий зв'язок, як відомо, збільшує ширину забороненої зони. Як наслідок, між об'ємною областю

і наночастинками з'являється бар'єр, який перешкоджає проникненню дірок всередину наночастинок. Розмір, за якого квантовий зв'язок стає значним, позначається R_Q і дорівнює 10 нм або менше [12]. При моделюванні процесів R_Q виражається в комірках сітки.

Алгоритм відрізняється від описаного вище: до стрибка дірка може зникнути і з'явитися в іншій точці кристала з імовірністю G .

Швидкість генерації g (с^{-1}) пов'язана з G співвідношенням [12]:

$$g = Gv_0 / l \quad (4)$$

де $l \sim 10^{-6-7}$ м – довжина вільного пробігу, $v \sim 10^5$ м/с – середня швидкість дірки. Після досягнення діркою межі розділу в деякій точці, аналізується околиця кристала поблизу неї. Якщо кристал містить сферу радіуса R_Q , то відбувається видалення частинки кремнію. В іншому разі дірка продовжує випадковий рух.

Пори в n-Si утворюються в результаті фотогенерації. Позитивний просторовий заряд утворюється дірками та іонізованими донорними домішками. Тому зі збільшенням рівня легування ефект фокусування електричного поля на лініях пор посилюється. Це робить механізм утворення макропор у n^+ -Si подібним до механізму утворення макропор у p^- -Si. Детальний опис на основі n-Si POR-SI є більш складним і не розглядається в даній роботі. Проаналізувавши отримані тривимірні структури було розраховано поруватість як функцію глибини h :

$$P(h) = N_{PS}(h) / N_j(h) \quad (5)$$

де $N_{PS}(h)$ – кількість комірок, що містяться в порах у моношарі на глибині h , $N_j(h)$ – загальна кількість комірок у цьому моношарі.

Фрактальну розмірність поруватості структури розраховували методом «пісочниці» [13] як:

$$D(i, j, k) = 3 \log_{ijk|j^*k^*} (N_{PD}(i, j, k) / N_{PD}(i^*, j^*, k^*)) \quad (6)$$

де $N_{PD}(x, y, z)$ – кількість паралелепіпедів $x \times y \times z$ ($x \leq 1, y \geq 1, z \geq 1$), що покривають сітку та містять принаймні хоча б одну кристалічну комірку. Сусідні значення (i, j, k) та (i^*, j^*, k^*) відрізняються не більше ніж на одиницю.

Матриця ділянок, отримана за допомогою комп'ютерного моделювання на двовірній сітці (160×160), з $N=80$ показана на рис. 3. Чорний колір відповідає порам. Пори ростуть униз від вершини кожної ділянки. Ефективні параметри R_D та L (з кроком сітки) показано для кожного рядка та стовпчика матриці. Видно, що діаметр пор збільшується зі збільшенням L , що відповідає збільшенню густини струму та/або зменшенню

концентрації HF. Цей результат узгоджується з експериментальними даними [4, 5]. У межах радіуса L пори є безперервними в плоско-паралельних напрямках, що узгоджується з фотографіями високої роздільної здатності та поперечного перерізу ПЕМ мікро- і мезопоруватих шарів Si [6]. Цей результат пояснюється зв'язком із включенням до моделювання фактора L , оскільки під час моделювання, заснованого на моделях, що базуються на звичайній ДІА, отримують лише розгладжені пори [6, 10]. Для $L=4$ і $R_D=0$ густина струму є достатньо великою для досягнення полірування. Збільшення R_D призводить до випрямлення пор і збільшення відстані між ними. За умов $L=0$ і $R_D=10$ і 20 напрямом росту майже заданий, оскільки активна зона для кожної пори обмежена її найнижчою точкою. Аналогічні умови були отримані в роботі Lehmann et. al. [9] в n-Si, використовуючи індукуючі ями та зворотне підсвічування.

Залежності поруватості структури від N не виявлено. Це означає, що пряма аналогія між кількістю дірок у процесі Монте-Карло і концентрацією дірок у реальному кристалі була б помилковою. В експерименті концентрація призводить до низки ефектів (зсув рівня Фермі, екранування Дебая, СКР та ін.), які автоматично не враховуються при моделюванні параметром N . Матриця плоскопаралельних перерізів змодельованих тривимірних структур ($160 \times 160 \times 80$) для $N=3000$ наведена на рис. 4. Виявлено близьку візуальну схожість між змодельованим та експериментальним виглядом, отриманим для ФП на підкладці p^- -Si [11]. Лінії та стовпчики позначені відносними глибинами h/h_{MAX} та ймовірністю генерації G , відповідно. R_Q дорівнював трьом крокам сітки. Чітко видно градієнт поруватості з глибиною, що якісно узгоджується з експериментальними даними, отриманими для POR-SI сильно легуваного бором методом SIMS [8]. Розрахунки показали, що dP/dh зменшується зі збільшенням G .

Для того, щоб інтерпретувати цей результат, спочатку пояснимо, чому градієнт виникає в моделі ДІА без генерації дірок ($G=0$). У дифузійно-обмеженому процесі росту дірки не можуть проникати знизу догори шару, що росте, оскільки вони ефективно захоплюються гілками розгалуженої структури. З цієї причини ріст переважно відбувається в тонкому передньому шарі. Охарактеризуємо його в будь-який момент часу поточною активною поверхнею, визначеною як кількість можливих центрів росту в передньому шарі. Початкова поверхня на межі розділу Si/HF має найбільшу активну поверхню. У міру розвитку клас-

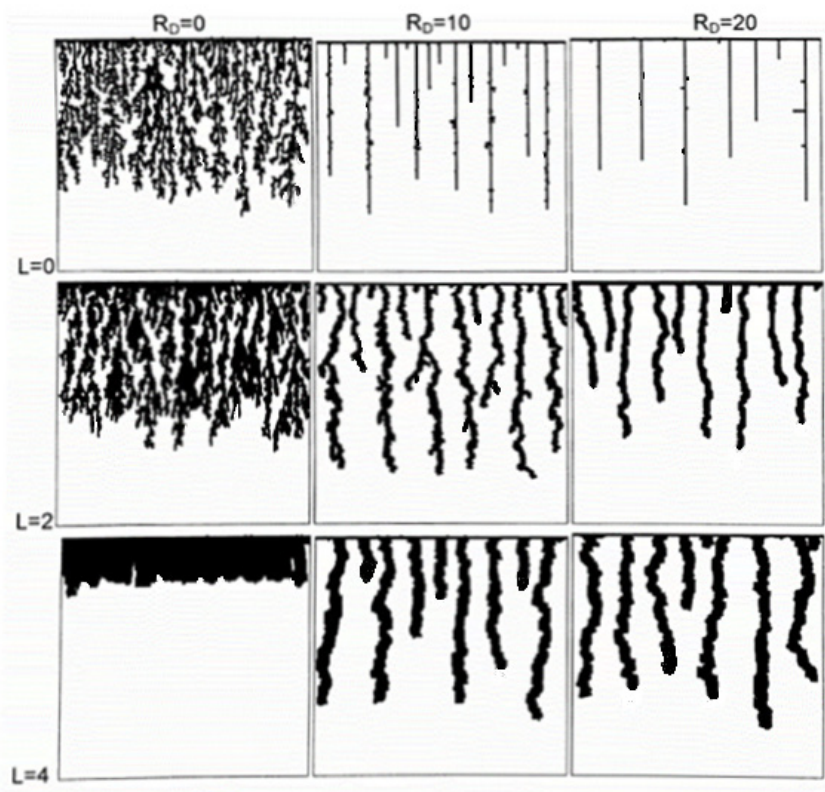


Рис. 2. Матриця графіків комп'ютерного моделювання з варіюванням ефективних параметрів L і RD ($N = 80$)

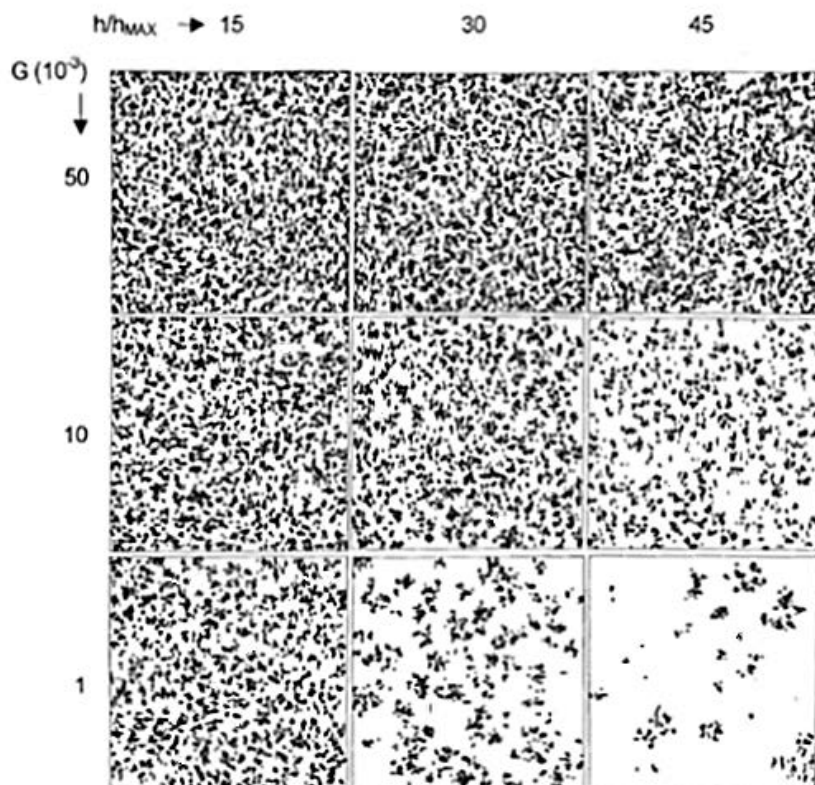


Рис. 3. Матриця комп'ютерного моделювання плоскопаралельних перерізів в залежності від h/h_{MAX} при зміні ефективного параметра G ($R_Q = 3$)

тера активна поверхня стає меншою (незважаючи на це, вся видова поверхня може збільшуватися). Еволюція активної поверхні визначає профіль поруватості, тому зміна активної поверхні призводить до градієнта поруватості. Генерація отворів дозволяє розташовувати отвори на будь-якій глибині шару POR-SI, і активна поверхня більше не обмежується переднім шаром. Потім діаметр пор збільшується доти, доки квантовий зв'язок у кристалічних наночастинках не стане суттєвим. Таким чином, одночасна дія генерації дірок і розмірного квантування веде до згладжування профілю поруватості. Криві $P(h/h_{max})$ для різних $G=0.05$ представлені на рис. 5, де h_{max} – максимальна глибина пор. Фактор G досить високий, щоб поруватий шар в основній області був однорідним. Різкий нахил поблизу вихідної межі пов'язаний з відмінністю умов зростання пор на початковій поверхні і на деякій глибині. Товщина перехідного шару між поруватим і суцільним кремнієм зменшується зі зростанням масштабу, на якому проявляється розмірне квантування за досить великого фактора термічної генерації ($G=0.05$).

Відмінності в чисельних значеннях поруватості змодельованих і експериментальних [12] структур ми пояснюємо тим, що побудована тривимірною моделлю формально може бути застосована до випадку слабо легovanого кремнію в режимі малих густин анодного струму.

У табл. 1 і 2 наведено порівняння даних моделювання та експерименту [13].

У таб. 1 щільність анодного струму є єдиним змінним параметром. В інтервалі $2 \text{ мА/см}^2 < j < 40 \text{ мА/см}^2$ спостерігається хороша відповідність. Для відповіді на запитання, чому виникають розбіжності за густини струму вище за 40 мА/см^2 , необхідно пояснити, що в моделі зна-

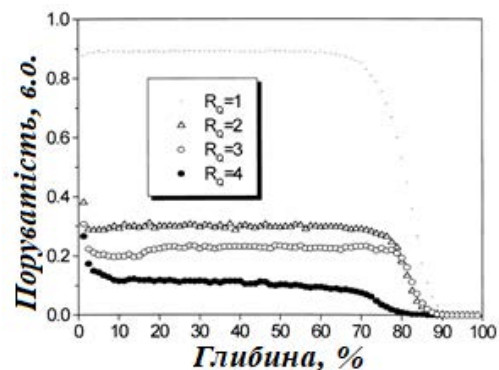


Рис. 4. Поруватість конструкцій, змодельованих на тривимірній сітці, залежно від глибини

чення $P=100\%$ зумовлено рівністю діаметра пор відстані між ними. В експерименті [2] густина анодного струму вище 40 мА/см^2 встановлювалася не одразу, а після попередньої стадії формування шару з поруватістю $P=30\%$ з малим діаметром пор (7–8 нм), середня відстань між якими була ~ 12 нм. Ці пори відігравали роль витратних місць для формування пір більшого діаметра в режимі $j > 40 \text{ мА/см}^2$, тому в підлягаючому шарі нові пори не виникали, а відбувалося розширення старих у діаметрі. При цьому для більшості пор виконувалася умова, коли їхній діаметр перевищував міжпорувату відстань, і під старими порами формувалася одна пора великого діаметра (25–100 нм). Якби цей процес відбувався однорідно по фронту зростаючого поруватого шару, то в підлеглому шарі весь кремній був би витравлений. Однак травлення кремнієвих міжпоруватих перегородок товщиною ~ 10 нм пригнічується, мабуть, через ефект розмірного квантування, який у моделі утворення сильно легovanого кремнію не враховувався.

Таблиця 1

Порівняння залежностей поруватості P від густини анодного струму j , отриманих у моделі та в експерименті [13]. рівень легування $p=10^{19} \text{ см}^{-3}$ ($p=0.006 \text{ Ом-см}$, $RD=1 \text{ нм}$), концентрація HF у розчині електроліту $c=20\%$

J мА/см^2	N_s см^2	$D_{\text{мод}}$ нм	$D_{\text{експ}}$ нм	$P_{\text{мод}}$ $\%$	$P_{\text{експ}}$ $\%$
0	-	7 ± 3	-	33	31 ± 2
1	-	7 ± 3	-	33	31 ± 2
2	-	7 ± 3	-	33	35 ± 2
10	$4 \cdot 10^{11}$	7 ± 3	-	33	36 ± 2
18	$4 \cdot 10^{11}$	7.5	7.5 ± 0.5	40	40 ± 3
22	$4 \cdot 10^{11}$	8.3	-	49	46 ± 3
40	$4 \cdot 10^{11}$	11.1	-	88	53 ± 3
60	$4 \cdot 10^{11}$	11.8	-	100	61 ± 3
80	$4 \cdot 10^{11}$	15.8	-	100	65 ± 3
120	$4 \cdot 10^{11}$	19.4	-	100	74 ± 3

Порівняння характерних значень діаметра пор залежно від густини анодного струму j і концентрації HF у розчині електроліту c , отриманих у моделі та в експерименті [3]

J, мА/см ²	Зваг., %	P, см ³	P, Ом*см	RD, нм	Dмод, нм	Дексп, нм
10	49	1017	0.09	10	2	8±2
10	10	1017	0.09	10	55	40±5
2	49	-	0.01	-	7±3	4±1

Висновки. Розроблено модифіковану ДЛА модель утворення POR-Si р-типу. У випадку сильно легovanого кремнію в моделі, крім дифузії дірок, враховано фокусування силових ліній електричного поля на днах пор і механізм селективного травлення на мікроскопічних нерівностях поверхні кремнію. У разі слабо легovanого кремнію в модель закладено, крім дифузії дірок, їхню термічну генерацію/рекомбінацію, а також ефект розмірного квантування в наночастинках кремнію. У р-Si це включає рельєфно-селективний механізм травлення, що враховує залежність морфології мезо- і мікро-ПР (зокрема, діаметра пор) від густини струму, концентрації HF і рівня легування. У р-Si

формування POR-Si ґрунтується на моделі ДЛА, що враховує теплову генерацію/рекомбінацію дірок і ефекту квантового зв'язку в кристалічних наноструктурах. в кристалічних наночастинках з урахуванням теплової генерації/комбінації дірок і ефекту квантового зв'язку. Морфологія структур змодельованих на основі вдосконаленої ДЛА-моделі близька до морфології експериментальних нанопоруватих структур. Поєднання теплової генерації з квантовим зв'язком зумовлює різні профілі поруватості за глибиною. Фрактальна розмірність, розрахована для змодельованої нанопоруватої структури, коливається від 0,1 до 3, оскільки розмір структури варіюється від 0,3 до 1 нм.

Список літератури:

1. Mimura H., Matsumoto T., Kanemitsu Y. PL properties of porous Si anodized with various light illuminations. *Appl. Surf. Sci.* 1996. V. 92. P. 396–399.
2. Оксанич А. П., Чебенко В. М., Притчин С. Е., Когдась М. Г., Мащенко М. А. Удосконалення методу отримання поруватих плівок GaAs з використанням нечіткого контролеру. *Радиоелектроніка та інформатика.* 2019. № 2(85). С. 4–8
3. Boehringer M., Artmann H., and Witt K. Porous silicon in a semiconductor manufacturing environment. *J. Microelectromech. Syst.* 2012. V. 21(6). P. 1375–1381.
4. Chen D., Xiuxun H., Xin G. et al. Electrical characterization of Cu Schottky contacts to n-type GaAs grown on (311) A/B GaAs substrates. *Journal of Alloys and Compounds.* 2016. Vol. 84. P. 325–329.
5. Когдась М. Г. Оксанич А.П., Паливода Є. А. Розробка автоматизованої системи визначення спектрів фотолюмінісценції у por-si *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського.* – 2016. – Вип. 5 (100) частина 2. С. 17–24.
6. B. V.Shulgin, A.N.Tcherepanov, V.Yu. Ivanov, T.S.Koroleva, M.M.Kidibaev, Ch. Pedrini, Ch. Dujardin. Luminescence spectroscopy of NaF:U bulk and fiber crystals. *Journal of Luminescence.* 2007. Vol.125, Iss. 1-2. P. 259–265.
7. M. Haurylau. Modelling of porous silicon formation process. *Materials Science and Engineering.* 2001 Volume 15, Iss. 1–2, P. 117–119
8. E. Xifré-Pérez, T. Trifonov, J. Pallarès, and L.F. Marsal. One-dimensional porous silicon photonic crystals for visible and NIR applications. *Physica Status Solidi.* 2005. 2 (9), P. 3466–3470.
9. V. Agarwal, and J.A. del Río, Tailoring the photonic band gap of a porous silicon dielectric mirror *Appl. Phys. Lett.*, 82, 1512 (2003).
10. C. Pacholski, M. Sartor, M.J. Sailor, F. Cunin, and G.M. Miskelly, Biosensing Using Porous Silicon Double-Layer Interferometers: Reflective Interferometric Fourier Transform Spectroscopy *J. Am. Chem. Soc.*, 127, 11636 (2005).
11. E. Xifré-Pérez, J. Pallarès, J. Ferré-Borrull, and L.F. Marsal. Guided modes in porous silicon multilayer waveguide structures. *Nanoelectronic and Photonic Systems Workshop. Spain : Tarragona,* 2006.
12. M. Bloemer, G. D'Aguanno, M. Scalora, and N. Mattiucci, Lasers, optics and optoelectronics. *Appl. Phys. Lett.*, 87, 261921 (2005).
13. Reflection Passband Broadening by Aperiodic Designs of EUV/Soft X-ray Multilayers.

Kogdas M.H., Prytchyn S.E., Palahin V.A., Oksanich A.P., Drahobetsky V.V., Lomonos A.I.
IMPROVEMENT OF THE MODEL OF THE MECHANISM OF FORMATION
OF THE P-SI POROUS LAYER

The study investigates the process of pore formation in lightly doped silicon (p-Si) and heavily doped silicon (n-Si) during anodic etching. Utilizing computer modeling on two- and three-dimensional grids, the research explores the influence of parameters such as current density, pore size, and hole generation probability on the morphology of the formed pores.

The research methodology involves employing computer simulations on two- and three-dimensional grids to analyze the impact of various parameters on the morphology of pores formed during anodic etching of lightly doped silicon (p-Si) and heavily doped silicon (n-Si). Parameters such as current density, pore size, and hole generation probability were studied.

The results indicate that in p-Si, pore growth predominantly occurs in the thin front layer due to a diffusion-limited process, resulting in surface roughness gradients. Conversely, in n-Si, the pore formation mechanism resembles that in p-Si due to electric field focusing effects along pore lines. At high current densities, the formation of large pores takes place, shaped by quantum confinement effects within crystalline nanoparticles. Discrepancies with experimental data are explained by phenomena such as the formation of large pores due to interactions with pre-existing pores and the influence of quantum confinement, which can suppress etching of silicon inter-pore partitions.

This research contributes novel insights into the mechanisms of pore formation in different types of silicon during anodic etching. The study explores the effects of various parameters and sheds light on the underlying processes leading to the formation of macro- and microporous structures, enhancing the understanding of semiconductor device production.

The findings have practical implications for the production of semiconductor devices with tailored macro- and microporous structures. Understanding the intricacies of pore formation in different silicon types during anodic etching can inform the manufacturing processes, potentially leading to improved semiconductor devices with enhanced properties.

The study illuminates crucial aspects of pore formation mechanisms in various types of silicon during anodic etching. The insights gained have practical applications in the fabrication of semiconductor devices, offering opportunities for optimizing their performance and characteristics through controlled pore formation processes.

Key words: anodic etching, silicon, pores, macroporosity, microporosity.

Відомості про авторів

Андрух Ю.М. – студент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Баженов В.Г. – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Безлуцький В.О. – аспірант кафедри «Залізничний, автомобільний транспорт та підйомно-транспортні машини» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

Бех П.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного сервісу та логістики Українського державного університету науки і технологій

Бех Я.П. – аспірант кафедри автоматики та телекомунікації Українського державного університету науки і технологій

Бобін М.А. – магістрант кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції Національного університету харчових технологій

Боженко М.Ф. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бондаренко Ю.А. – здобувач кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

Борець І.В. – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри організації авіаційних перевезень Національного авіаційного університету

Босий М.В. – старший викладач кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва Центральноукраїнського національного технічного університету

Бошкова І.Л. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету

Бунько В.Я. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри енергетики і автоматики Відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

Бурковський Я.Ю. – аспірант кафедри прикладної радіоелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Валько А.М. – старший викладач кафедри організації авіаційних перевезень Національного авіаційного університету

Васильєв Г.С. – доктор технічних наук, доцент кафедри технології електрохімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Висоцька І.І. – кандидат економічних наук, доцент кафедри організації авіаційних перевезень Національного авіаційного університету

Вишневська Л.В. – магістрант кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції Національного університету харчових технологій

Вишневська О.Д. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Експлуатація флоту і технології морських перевезень» Одеського національного морського університету

Вишневський Д.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Експлуатація флоту і технології морських перевезень» Одеського національного морського університету

Волгушева Н.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету

Воробйова В.І. – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ворона Ю.В. – магістрант кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції Національного університету харчових технологій

Воронов В.В. – аспірант кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

Гаврилюк С.О. – здобувачка другого курсу бакалаврського рівня факультету транспорту, менеджменту і логістики Національного авіаційного університету

Гаража О.П. – доктор економічних наук, доцент, професор кафедри організації авіаційних перевезень Національного авіаційного університету

Гльойнік К.А. – LUXOFT-UKRAINE, LLC

Головіна О.В. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій Філії Класичного приватного університету у місті Кременчук

Голощанов С.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії

Дарморіс П.М. – старший викладач кафедри енергетики і автоматики Відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

Доля К.В. – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобілів та транспортної інфраструктури Національного аерокосмічного університету імені М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

Доля О.Є. – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних управляючих систем Харківського національного університету радіоелектроніки

Драгобецький В.В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машинобудування Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Євпак В.В. – студент першого курсу групи ХП-31мп кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Єфімова В.Г. – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Земцова В.В. – студент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Зіньковський Ю.Ф. – доктор технічних наук, професор, Академік Національної академії наук України, професор кафедри прикладної радіоелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Золотарьова О.В. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної інженерії та екології Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

Іванов А.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії

Іванченко А.В. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

Камишний Б.М. – магістрант 1 курсу групи ТУ-31мп кафедри теплової та альтернативної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Капауз К.О. – аспірант четвертого курсу групи А144 кафедри нафтогазових технологій, інженерії та теплоенергетики Одеського національного технологічного університету

Коваль М.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічних технологій та водоочищення Черкаського державного технологічного університету

Когдась М.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та інформаційних систем Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Козинка О.С. – аспірант кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державного університету інфраструктури та технологій

Колєбанов О.К. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії

Кононогов Ю.А. – провідний інженер Національного наукового центру «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства»

Коскіна Ю.О. – доктор технічних наук, професор кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

Кропівна А.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва Центральноукраїнського національного технічного університету

Кропівний В.М. – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва Центральноукраїнського національного технічного університету

Кузик О.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва Центральноукраїнського національного технічного університету

Кузьменко А.І. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики Університету митної справи та фінансів

Кутковецька Т.О. – доцент, кандидат економічних наук, доцент кафедри агроінженерії Уманського національного університету садівництва

Кутний Б.А. – доктор технічних наук, професор кафедри теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Лабунський П.І. – студент II курсу магістратури групи ПК-21мп кафедри автоматизації та системи неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лашков О.В. – старший викладач кафедри транспортного сервісу та логістики Українського державного університету науки і технологій

Литвиненко А.С. – аспірант кафедри «Залізничний, автомобільний транспорт та підйомно-транспортні машини» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

Ломонос А.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та інформаційних систем Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Мельник Л.І. – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Мініна Ю.О. – аспірант кафедри біотехнології та безпеки життєдіяльності ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Мітіна Н.Б. – кандидат технічних наук, доцент кафедри біотехнології та безпеки життєдіяльності ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Морозова Д.О. – студент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Москаленко Г.В. – викладач циклової комісії автомобільного транспорту Відокремленого структурного підрозділу «Технологічний фаховий коледж» Дніпровського державного технічного університету

Нікітін М.О. – аспірант кафедри технології неорганічних речовин та екології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Оксанич А.П. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизації та інформаційних систем Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Онищенко С.П. – доктор економічних наук, професор, професор кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

Осадчук М.В. – науковий співробітник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Палагін В.А. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та інформаційних систем Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Пантелєєва І.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики Української інженерно-педагогічної академії

Пилипенко Т.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Присяжнюк В.В. – начальник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Притчин С.Е. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та інформаційних систем Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Решетков Д.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт Одеського національного морського університету

Родін Д.О. – аспірант кафедри технології неорганічних речовин та екології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Рудасьов В.Б. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автомобілів та автомобільного господарства Дніпровського державного технічного університету

Самченко Т.В. – старший науковий співробітник відділу речовин і матеріалів науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Свірський В.В. – молодший науковий співробітник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Семичаєвський С.В. – старший науковий співробітник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Скиба М.І. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри екології та технології неорганічних речовин ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Скиба Ю.М. – аспірант кафедри екології та технології неорганічних речовин ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Смірнов Ю.О. – кандидат економічних наук, доцент Фізико-технологічного інституту металів та сплавів Національної академії наук України

Соколова О.Є. – кандидат економічних наук, доцент кафедри організації авіаційних перевезень Національного авіаційного університету

Соловійова О.О. – кандидат економічних наук, доцент кафедри економіки та бізнес-технологій Національного авіаційного університету

Сорока О.В. – аспірант кафедри хімічних та біологічних технологій Дніпровського державного технічного університету

Тихонін В.І. – старший викладач кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт Одеського національного морського університету

Третяков А.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Фомін О.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державного університету інфраструктури та технологій

Фролова Л.А. – доктор технічних наук, професор кафедри технології неорганічних речовин та екології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Фролова Н.Е. – доктор технічних наук, професор кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції Національного університету харчових технологій

Хітров І.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних технологій і технічного сервісу Національного університету водного господарства та природокористування

Цебрюк І.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автобронетанкової техніки Національної академії Національної гвардії України

Черненко П.В. – старший викладач кафедри автобронетанкової техніки Національної академії Національної гвардії України

Чернецька І.В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Черняк Л.П. – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Шевчук Д.О. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор, завідувач кафедри організації авіаційних перевезень Національного авіаційного університету

Шматько Н.М. – доктор економічних наук, професор, професор кафедри менеджменту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Шнейдер С.В. – магістрант кафедри теплогазопостачання, вентиляції та теплоенергетики Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Якіменко М.Л. – науковий співробітник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Якубовський О.М. – кандидат технічних наук, викладач циклової комісії автомобілів і транспортних технологій Відокремленого структурного підрозділу «Дніпровський фаховий коледж інженерії та педагогіки» Державного вищого навчального закладу «Український державний хіміко-технологічний університет»

Науковий журнал

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

Серія: Технічні науки

Том 35 (74) № 1 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

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 21,72. Ум. друк. арк. 37,2. Зам. № 0324/181

Підписано до друку 28.12.2023. 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

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.