

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
ІНІ «ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ»

УКРАЇНСЬКИЙ ЖУРНАЛ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

№ 6 (030)
листопад – грудень 2025

Дніпро 2025

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Головний редактор	Микола САВИЦЬКИЙ, д-р техн. наук, УДУНТ, Дніпро
Заступник головного редактора	Владислав ДАНШЕВСЬКИЙ, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро
Відповідальний секретар	Олена ТИМОШЕНКО, к-т техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро
Випусковий редактор	Олена ТИМОШЕНКО, к-т техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

А. С. Беліков, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. М. М. Біляєв, д-р техн. наук, Український державний університет науки і технологій (УДУНТ), Дніпро. В. І. Большаков, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. В. Є. Волкова, д-р техн. наук, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро. В. М. Волчук, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. С. І. Губенко, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. Ю. О. Кірічек, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. Т. С. Кравчуновська, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. Ю. І. Криворучко, д-р арх., Національний університет «Львівська політехніка», Львів. О. О. Лапшин, д-р техн. наук, Криворізький національний університет, Кривий Ріг. В. П. Мироненко, д-р арх., Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків. М. М. Налисько, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. Т. Д. Нікіфорова, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. В. І. Проскуряков, д-р арх., Національний університет «Львівська політехніка», Львів. В. Л. Седін, д-р техн. наук, ННІ ПДАБА, Дніпро. В. В. Товбич, д-р арх., Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ. О. В. Харлан, к-т арх., ННІ ПДАБА, Дніпро. Едіт Барна, к-т техн. наук, Будапештський технічно-економічний університет, Будапешт (Угорщина). Анна Бач, д-р арх., Вроцлавський університет, Вроцлав (Польща). Александрс Корякінс, д-р техн. наук, Ризький технічний університет, Рига (Латвія). В. І. Куксенко, к-т техн. наук, Управління з атомної енергетики Великобританії, Оксфорд (Великобританія). Богуслав Подхалянський, д-р арх., Краківський політехнічний інститут імені Тадеуша Костюшка, Краків (Польща).

Науково-практичний журнал входить до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б»), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук та архітектури за спеціальностями 132, 191, 192, 194, 263 згідно з наказом Міністерства освіти і науки України від 09.02.2021 № 157 (Додаток 3).

Свідоцтво про Державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації – серія КВ № 24586-14526 ПР – видане Міністерством юстиції України 09 жовтня 2020 р.

Засновник та видавець Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» (код за ЄДРПОУ 02070772).

Виходить 6 разів на рік.

Рекомендовано до друку вченою радою «Українського університету науки та технологій» протокол № 4 від 26.12.2025.

Сайт видання <http://uajcea.pgasa.dp.ua>

Наукометричні бази та електронні бібліотеки, в яких зареєстрований науково-практичний журнал: Інформаційно-аналітичні системи: InfoBase Index (IBI Factor = 3,96), Universal Impact Factor, Open Academic Journal Index, Directory, Indexing of International Research Journals (CiteFactor). Електронні бібліотеки та пошукові системи: Bielefeld Academic Search Engine (BASE), OCLC WorldCat, Open Journal Systems, Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського.

ISSN 2710-0367 (Print)
2710-0375 (Online)

Художній і технічний редактор Сергій МОЇСЕСЬКО
Редактор та коректор Олена ТИМОШЕНКО

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES
ESI “PRYDNIPROVSKA STATE ACADEMY
OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE”**

UKRAINIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE

SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL

№ 6 (030)
November – December 2025

Dnipro 2025

EDITORIAL STAFF :

<i>Chief Editor</i>	Mykola SAVYTSKYI, Doctor of Engineering Science, <i>USUST, Dnipro</i>
<i>Deputy Chief Editor</i>	Vladyslav DANISHEVSKYI, Doctor of Engineering Science, <i>ESI PSACEA, Dnipro</i>
<i>Executive Secretary</i>	<i>Dnipro</i>
<i>Executive Editor</i>	Olena TYMOSHENKO, Candidate of Engineering Science, <i>ESI PSACEA, Dnipro</i> Olena TYMOSHENKO, Candidate of Engineering Science, <i>ESI PSACEA, Dnipro</i>

MEMBERS OF EDITORIAL STAFF :

A.S. Belikov, Doctor of Engineering Science, *ESI "Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture" (ESI PSACEA), Dnipro*. M.M. Biliaiev, Doctor of Engineering Science, *Ukrainian State University of Science and Technologies (USUST), Dnipro*. V.I. Bolshakov, Doctor of Engineering Science, *ESI PSACEA, Dnipro*. V.Yev. Volkova, Doctor of Engineering Science, *Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro*. V.M. Volchuk, Doctor of Engineering Science, *ESI PSACEA, Dnipro*. S.I. Gubenko, Doctor of Engineering Science, *PSACEA, Dnipro*. Yu.O. Kirichuk, Doctor of Engineering Science, *ESI PSACEA, Dnipro*. T.S. Kravchunovska, Doctor of Engineering Science, *ESI PSACEA, Dnipro*. Yu.I. Kryvoruchko, Doctor of Architecture, *National University "Lviv Polytechnic", Lviv*. O.O. Lapshyn, Doctor of Engineering Science, *Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih*. V.P. Myronenko, Doctor of Architecture, *O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv*. M.M. Nalysko, Doctor of Engineering Science, *ESI PSACEA, Dnipro*. T.D. Nikiforova, Doctor of Engineering Science, *ESI PSACEA, Dnipro*. V.I. Proskuriakov, Doctor of Architecture, *National University "Lviv Polytechnic", Lviv*. V.L. Siedin, Doctor of Engineering Science, *ESI PSACEA, Dnipro*. V.V. Tovbych, Doctor of Architecture, *Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv*. O.V. Kharlan, Candidate of Architecture, *ESI PSACEA, Dnipro*. Edit Barna, PhD, *Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary*. Anna Bać, Doctor of Architecture, *Wroclaw University of Science and Technology, Wroclaw, Poland*. Aleksandrs Korjakins, Doctor of Engineering Science, *Riga Technical University, Riga, Latvia*. V. I. Kuksenko, PhD, Candidate of Engineering Science, *UK Atomic Energy Authority, Oxford, UK*. Boguslaw Podhalyanski, Doctor of Architecture, *Cracow University of Technology, Cracow (Poland)*.

Scientific-Practical Journal is included in	List of scientific professional publications of Ukraine (category "B"), where the results of dissertations for the degree of Doctor and Candidate of Engineering Sciences and Architecture (by specialty 132, 191, 192, 194, 263) can be published according to the Resolution of the Ministry of Science and Education of Ukraine No. 157 dated 09.02.2021 (Appendix no. 3).
Certificate of State Registration	of the Print Media – Series KB No. 24586-14526 ПП – issued by the Ministry of Justice of Ukraine dated October 09, 2020.
Founder & Publisher	State Higher Education Institution "Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture". Issued 6 times a year.
Recommended for publication by	Academic Board of the Ukrainian State University of Science and Technologies, no. 4 from 26.12.2025
Journal website	http://uajcea.pgasa.dp.ua
Placement of the scientific-practical journal in the international scientometric databases and e-libraries	Information and analytical systems: InfoBase Index (IBI Factor = 3.96), Universal Impact Factor, Open Academic Journal Index, Directory Indexing of International Research Journals (CiteFactor). <i>Electronic Libraries and search engines</i> : Bielefeld Academic Search Engine (BASE), OCLC WorldCat, Open Journal Systems, Vernadsky National Library of Ukraine.
ISSN	2710-0367 (Print) 2710-0375 (Online)

Art & Technical Editor Serhii MOISEIENKO
Editor & Proofreader Olena TYMOSHENKO

У ЦЬОМУ НОМЕРІ

Балакін К. В., Колесниченко К. А. СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ФАКТОРІВ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ДОЦІЛЬНІСТЬ РЕКОНСТРУКЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ПРОМИСЛОВОЇ НЕРУХОМОСТІ НА ОСНОВІ ПРИНЦИПІВ РЕВІТАЛІЗАЦІЇ.....	7
Беспалова А. В., Книш О. І., Дашковська О. П., Файзуліна О. А. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСОНАЛЬНОГО ШУМОЗАХИСТУ НА БУДІВЕЛЬНОМУ МАЙДАНЧИКУ.....	17
Беліков А. С., Стрежекуров Ю. Е., Клименко Г. О., Тодоров О. П. МЕТОДОЛОГІЯ МОНІТОРИНГУ І ОЦІНКИ УМОВ ПРАЦІ НА ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВАХ В УМОВАХ ТЕПЛООВОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА РОБОЧИХ МІСЦЯХ.....	26
Білополий В. В., Гребінник Т. О. ФІЛОСОФСЬКІ ПРОБЛЕМИ ОСВІТИ : УКРАЇНСЬКИЙ АСПЕКТ.....	34
Біляев М. М., Біляева О. М. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ АЕРОІОНІВ В РОБОЧОМУ ПРИМІЩЕННІ : РІШЕННЯ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ.....	42
Воробйов В. В., Шило О. С. ФІЗИЧНИЙ СЕНС ПОНЯТЬ «ДУХ, ДУША І ГЕНЕТИЧНИЙ КОД МІСТА».....	50
Давидов І. І., Чабан В. П., Ковтун-Горбачова Т. А., Ковтун К. А. АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬ ІЗ РІЗНИМИ КОНСТРУКТИВНИМИ СХЕМАМИ ДО ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ ВНАСЛІДОК РАКЕТНИХ УДАРІВ.....	65
Дейнеко Л. М., Шпортько Ю. В. СПОСІБ ОТРИМАННЯ НАНОБЕЙНІТУ В СТАЛЯХ : СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	77
Зайцев В. І. АНАЛІЗ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЇ ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЇ ТИПОВИХ БАГАТОПОВЕРХОВИХ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ.....	89
Кімстач Т. В., Білий О. П. ПОРІВНЯЛЬНА КОРОЗІЙНА СТІЙКІСТЬ БРОНЗ У ВОДНОМУ РОЗЧИНІ ХЛОРИСТОГО ЗАЛІЗА.....	99
Кравчуновська Т. С., Бородін М. О., Остапюк М. О. ПЕРСПЕКТИВИ ОПТИМІЗАЦІЇ БУДІВНИЦТВА ДОСТУПНОГО ЖИТЛА В УМОВАХ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ГАЛУЗІ.....	112
Мартиш О. П., Мартиш О. О., Горін Р. О., Тимошенко О. А., Нагорний Д. В. ДОСЛІДЖЕННЯ ВАРІАНТІВ ОРГАНІЗАЦІЇ МОНТАЖУ КОНСТРУКЦІЙ ОДНОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ ЗАЛЕЖНО ВІД УМОВ ВИРОБНИЦТВА.....	120
Матюшенко С. Ю., Соколов І. А. ДОСЛІДЖЕННЯ ТРУДОМІСТКОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ЯК ОСНОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ СПОРУДЖЕННЯ БУДІВЕЛЬ.....	130
Савицький М. В., Шехоркіна С. Є., Бордун М. В., Смирнов А. С., Лясота О. В. МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ БЕТОНІВ ТА РОЗЧИНІВ ДЛЯ ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ.....	141
Яровий С. М., Яровий Ю. М., Титюк А. О., Данильченко О. О. ПОШКОДЖУВАНІСТЬ МЕТАЛЕВИХ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ І ДИМОВИХ ТРУБ ТА ЇХ СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ.....	149

CONTENT

Balakin K.V., Kolesnychenko K.A. SYSTEMATIZATION OF FACTORS THAT DETERMINE THE EXPEDIENCY OF RECONSTRUCTION OF INDUSTRIAL REAL ESTATE OBJECTS BASED ON THE PRINCIPLES OF REVITALIZATION.....	7
Bespalova A.V., Knysh O.I., Dashkovska O.P., Fayzulyna O.A. RESEARCH OF PERSONAL NOISE PROTECTION ON A CONSTRUCTION SITE.....	17
Bielikov A.S., Strezhekurov Yu.E., Klymenko H.O., Todorov O.P. METHODOLOGY FOR MONITORING AND ANALYSIS OF WORKING CONDITIONS AT INDUSTRIAL ENTERPRISES UNDER THERMAL LOAD ON WORKPLACES.....	26
Bilopoly V.V., Hrebinyk T.O. PHILOSOPHICAL PROBLEMS OF EDUCATION:UKRAINIAN ASPECT.....	34
Biliaiev M.M., Biliaieva O.M. MATHEMATICAL MODELING OF ION DISPERSION IN ROOM : OPTIMIZATION PROBLEM SOLVING.....	42
Vorobiov V.V., Shylo O.S. PHYSICAL MEANING OF THE CONCEPTS OF “SPIRIT, SOUL AND GENETIC CODE OF THE CITY”.....	50
Davydov I.I., Chaban V.P., Kovtun-Horbachova T.A., Kovtun K.A. ANALYSIS OF THE STABILITY OF BUILDINGS WITH DIFFERENT STRUCTURAL SYSTEMS AGAINST PROGRESSIVE COLLAPSE DUE TO MISSILE STRIKES.....	65
Deineko L.M., Shportko Yu.V. METHOD OF OBTAINING NANOBAINITE IN STEELS : MODERN TECHNOLOGIES.....	77
Zaitsev V.I. ANALYSIS OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR THE COMPREHENSIVE THERMAL MODERNIZATION OF TYPICAL MULTI-STOREY RESIDENTIAL BUILDINGS.....	89
Kimstach T.V., Bilyi O.P. COMPARATIVE CORROSION RESISTANCE OF BRONZE IN AN AQUEOUS SOLUTION OF FERRIC CHLORIDE.....	99
Kravchunovska T.S., Borodin M.O., Ostapuk M.O. PROSPECTS FOR OPTIMIZING AFFORDABLE HOUSING CONSTRUCTION IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATION OF THE INDUSTRY.....	112
Martysh O.P., Martysh O.O., Horin R.O., Tymoshenko O.A., Nagorny D.V. DEVELOPMENT OF CONSTRUCTIVE DESIGN OF PICKLING UNITS FOR OPERATION IN HIGHLY AGGRESSIVE HOT SULPHURIC ACID SOLUTIONS.....	120
Matiushenko S.Yu., Sokolov I.A. RESEARCH ON THE LABOR INTENSITY OF CONSTRUCTION PROCESSES AS THE BASIS FOR OPTIMIZING ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR BUILDING CONSTRUCTION.....	130
Savytskyi M.V., Shekhorkina S.Yev., Bordun M.V., Smyrnov A.S., Lyasota O.V. METHODOLOGICAL PRINCIPLES FOR DEVELOPING ELECTRICALLY CONDUCTIVE CONCRETES AND MORTARS FOR ELECTROMAGNETIC FIELD SHIELDING.....	141
Yarovy S.M., Yarovy Yu.M., Tytiuk A.O., Danylchenko O.O. DAMAGEABILITY OF METAL VENTILATION AND SMOKE PIPES AND THEIR STATISTICAL ANALYSIS.....	149

УДК 69.059.7

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.241225.7.1204

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ФАКТОРІВ, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ДОЦІЛЬНІСТЬ РЕКОНСТРУКЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ПРОМИСЛОВОЇ НЕРУХОМОСТІ НА ОСНОВІ ПРИНЦИПІВ РЕВІТАЛІЗАЦІЇ

БАЛАКІН К. В.^{1*}, *асп.*,
КОЛЕСНИЧЕНКО К. А.², *студ.*

^{1*} Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (099) 796-64-12, e-mail: balakinkonst@gmail.com, ORCID ID: 0009-0007-8329-3505

² Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (093) 995-11-10, e-mail: kolesnychenko.kyrylo@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0008-0598-2935

Анотація. Постановка проблеми. На сьогодні практично в кожному місті України, в силу різних причин, є об'єкти промислової нерухомості, які припинили своє функціонування і перебувають у занедбаному стані. Разом із цим такі об'єкти зазвичай займають доволі великі площі, а в умовах нестачі вільних земельних ділянок для будівництва об'єктів житлового і громадського призначення такі промислові території можуть розглядатися як певний резерв. Тому потрібно розробити інструментарій прийняття рішень щодо управління об'єктами промислової нерухомості зі зміною їх функціонального призначення. Результатом ревіталізації є відновлення життя у дисфункціональних та деградованих промислових зонах міст. Проекти редевелопменту розкривають потенціал щодо покращення міського середовища, розвитку туризму та зусиль щодо сталого розвитку міст, перетворюючи колишні промислові будівлі на місця тяжіння завдяки адаптації функціонального використання цих об'єктів, прокладаючи шлях до сталого та інклюзивного будівництва і майбутнього міст. Проте на сьогодні відсутнє вичерпне обґрунтування показників ефективності проектів ревіталізації промислових будівель, яке б враховувало множину інноваційних, ресурсних та інших факторів. **Мета статті.** Виявлення множини інноваційних, ресурсних та інших факторів, які визначають доцільність та ефективність ревіталізації промислових будівель. **Висновок.** Одним із вирішальних факторів щодо проектів редевелопменту на основі принципів ревіталізації є виявлення незавантажених і неефективно використовуваних промислових будівель та забезпечення ефективного і гнучкого використання обмежених земельних ресурсів, пристосовуючи їх до мінливої економіки сучасних міст. Для досягнення цієї мети потрібно виконати критичний аналіз поточних потреб розвитку міст і використовувати ревіталізовані простори для цих потреб. При ревіталізації промислових будівель особливу увагу слід приділяти сталості будівель, зважаючи на турботу про довкілля та долю майбутніх поколінь, а також орієнтацію будівельної галузі на створення екологічно дружніх об'єктів.

Ключові слова: реконструкція; ревіталізація; промислова будівля; SWOT аналіз; ефективність; фактори

SYSTEMATIZATION OF FACTORS THAT DETERMINE THE EXPEDIENCY OF RECONSTRUCTION OF INDUSTRIAL REAL ESTATE OBJECTS BASED ON THE PRINCIPLES OF REVITALIZATION

BALAKIN K.V.^{1*}, *PhD Stud.*,
KOLESNYCHENKO K.A.², *Stud.*

^{1*} Department of Organisation and Management in Construction, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (099) 796-64-12, e-mail: balakinkonst@gmail.com, ORCID ID: 0009-0007-8329-3505

² Department of Organisation and Management in Construction, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (093) 995-11-10, e-mail: kolesnychenko.kyrylo@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0008-0598-2935

Abstract. Raising of problem. Today, for various reasons, virtually every city in Ukraine has industrial real estate properties that have ceased to function and are in a state of disrepair. At the same time, such properties usually occupy quite large areas, and given the shortage of vacant land for residential and public construction, these industrial areas can be considered a reserve of sorts. Therefore, it is necessary to develop decision-making tools for managing industrial real

estate properties with a change in their functional purpose. The result of revitalization is the restoration of life in dysfunctional and degraded industrial areas of cities. Redevelopment projects unlock the potential for improving the urban environment, developing tourism, and promoting sustainable urban development by transforming former industrial buildings into places of attraction through the adaptation of the functional use of these facilities, paving the way for sustainable and inclusive construction and the future of cities. However, there is currently no comprehensive justification for the effectiveness indicators of industrial building revitalization projects that would take into account a variety of innovative, resource, and other factors. However, there is currently no comprehensive substantiation of the effectiveness factors of industrial building revitalization projects that would take into account a variety of innovative, resource, and other factors **Purpose of the article**. Identification of a number of innovative, resource, and other factors that determine the expediency and effectiveness of industrial building revitalization. **Conclusion**. One of the decisive factors in redevelopment projects based on revitalization principles is the identification of underutilized and inefficiently used industrial buildings and ensuring the effective and flexible use of limited land resources, adapting them to the changing economy of modern cities. To achieve this goal, it is necessary to critically analyze the current development needs of cities and use revitalized spaces for these needs. When revitalizing industrial buildings, special attention should be paid to the sustainability of buildings, taking into account concern for the environment and the fate of future generations, as well as the construction industry's focus on creating environmentally friendly facilities.

Keywords: reconstruction; revitalization; industrial building; SWOT analysis; efficiency; factors

Постановка проблеми. На сьогодні практично в кожному місті України, в силу різних причин, є об'єкти промислової нерухомості, які припинили своє функціонування і перебувають у занедбаному стані. Разом із цим такі об'єкти зазвичай займають доволі великі площі, а в умовах нестачі вільних земельних ділянок для будівництва об'єктів житлового і громадського призначення такі промислові території можуть розглядатися як певний резерв. Тому потрібно розробити інструментарій прийняття рішень щодо управління об'єктами промислової нерухомості зі зміною їх функціонального призначення. Основу для цього може становити концепція ревіталізації промислових будівель. Це відповідає основним положенням Закону України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» від 28 лютого 2019 року № 2697-VIII [1], Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності» від 17 лютого 2011 р. № 3038-VI [2], Постанови Верховної Ради України «Про Концепцію сталого розвитку населених пунктів» від 24 грудня 1999 р. № 1359-XIV [3], Постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на 2021–2027 роки» від 5 серпня 2020 р. № 695 [4].

Аналіз публікацій. Розвиток міського середовища нерозривно пов'язаний зі змінами соціально-економічних умов.

Зміни в економіці, структурі виробництва, у чисельності міського населення призводять до необхідності реалізації проєктів редевелопменту, спрямованих на реконструкцію промислових будівель на основі принципів ревіталізації.

Ревіталізацію можна визначити як складний процес виведення деградованих територій з кризи шляхом цілеспрямованих дій (взаємопов'язаних зусиль), що здійснюються в соціальній, економічній, просторово-функціональній, технічній та екологічній сферах, об'єднуючи ініціативи на користь місцевої громади, простору та місцевої економіки [5].

Результатом ревіталізації є відновлення життя у дисфункціональних та деградованих промислових зонах міст [6; 7].

Інвестиції в ревіталізацію промислових будівель, завдяки поєднанню збереження містобудівної спадщини та інноваційних рішень, перетворюють деградовані об'єкти на нові привабливі, економічно життєздатні місця, які залучають активних підприємців, творчу інтелігенцію та молодь.

Проєкти редевелопменту розкривають потенціал щодо покращення міського середовища, розвитку туризму та зусиль щодо сталого розвитку міст, перетворюючи колишні промислові будівлі на місця

тяжіння завдяки адаптації функціонального використання цих об'єктів, прокладаючи шлях до сталого та інклюзивного будівництва і майбутнього міст [5–7].

Проте на сьогодні відсутнє вичерпне обґрунтування показників ефективності проєктів ревіталізації промислових будівель, яке б враховувало множину інноваційних, ресурсних та інших факторів.

Формулювання мети статті та постановка завдань. Метою дослідження є виявлення множини інноваційних, ресурсних та інших факторів, які визначають доцільність та ефективність ревіталізації промислових будівель.

Результати досліджень. Недорожчання нерухомість була і залишається одним із найвигідніших активів для інвестування. Протягом останніх десяти років на українському ринку нерухомості спостерігалась тенденція до її здорожчання.

На сьогодні ринок нерухомості, зокрема промислової нерухомості, перебуває під впливом воєнного чинника, пов'язаного з повномасштабним вторгненням Російської Федерації в Україну.

Інвестиційна привабливість всіх видів нерухомості після початку

повномасштабного вторгнення знизилась через високу ризикованість. Головна загроза для нерухомості – це загроза фізичного знищення об'єктів через обстріли.

Наразі значна частка інвестицій у нерухомість спрямована на західні області України через їх відносну безпечність і релокацію до них промислових виробництв зі східних та південних областей. Це тягне за собою зростання попиту на складські приміщення для цих промислових виробництв.

До промислової нерухомості належать будівлі виробничого призначення, наприклад, фабрики, майстерні, заводи, складальні підприємства тощо.

Аналізуючи розвиток промислової нерухомості протягом 2023–2024 рр., можна відзначити такі основні чинники впливу:

- розвиток переміщених промислових підприємств;
- впровадження «зелених» стандартів;
- інвестиції в автоматизацію виробничих процесів;
- зростання вартості трудових ресурсів.

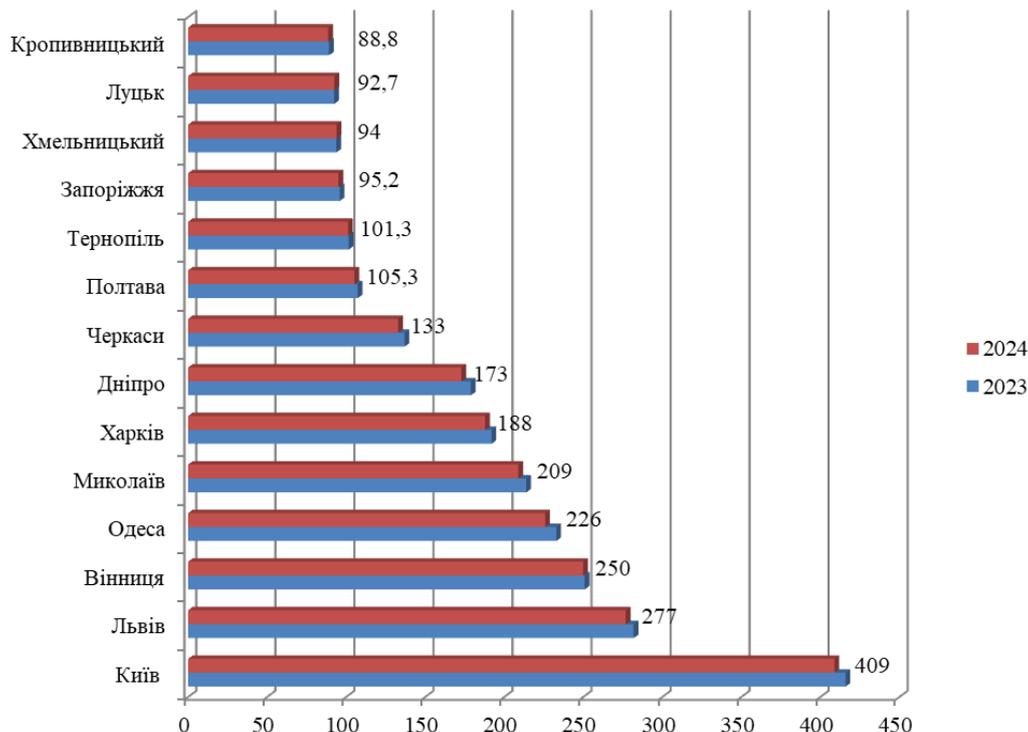


Рис. 1. Середня вартість промислової нерухомості, USD/m²

Результати аналізу цін пропозицій промислової нерухомості по областях України представлені на рисунку 1 [8].

Як свідчать дані, представлені на рисунку 1, у 2024 р. практично по всіх областях України зафіксовано зниження вартості 1 м² промислової нерухомості, за виключенням Хмельницького та Луцька, де відзначено зростання вартості, порівняно з 2023 р., на 0,1 % та на 0,2 % відповідно.

Аналізуючи сучасні тенденції розвитку ринку промислової нерухомості, слід відмітити зростання кількості індустріальних парків в Україні протягом 2022–2024 років, а також ревіталізацію таких об'єктів під житлову нерухомість у вигляді лофтів [9; 10].

За оцінками фахівців, 40 % індустріальних парків зареєстровано на територіях, що називаються «браунфілд», або колишніх промислових зонах, які підлягали ревіталізації [9; 10].

Індустріальні парки відрізняються від звичайних промислових зон тим, що являють собою багатофункціональні комплекси: створюються не лише нові високотехнологічні, екобезпечні виробництва, але й офісні приміщення, коворкінги, заклади харчування, заклади дозвілля, магазини тощо.

Особливістю індустріальних парків є те, що окрім виробничих та складських площ вони надають підприємцям необхідну інфраструктуру: електро-, газо-, тепло-, водопостачання, водовідведення.

Інвесторів приваблюють індустріальні парки тим, що:

- надають можливість скористатися податковими та митними пільгами на виробниче обладнання;

- надають можливість фінансувати з бюджету підведення інфраструктури та мереж;

- надають можливість компенсації відсоткових ставок по кредитах;

- надають можливість звільнення від податку на прибуток на 10 років за переліком видів діяльності за умови реінвестування.

В індустріальних парках найрозповсюдженішими виробництвами є підприємства будівельної індустрії та харчової промисловості [11].

Забезпечення населення доступним житлом також є важливою соціально-економічною проблемою в Україні.

Наприклад, в м. Дніпро існує дефіцит доступного житла, особливо після початку збройної агресії Російської Федерації проти України, коли місто надало прихисток багатьом особам, вимушеним залишити свої домівки у східних та південних областях, безпосередньо наближених до зон ведення бойових дій.

Для створення доступного житла потрібні вільні земельні ділянки, які можна використати під житлову забудову.

Територія міста Дніпро становить 40507,67 га [12], яка за функціональним призначенням поділяється на землі, відведені під житлову і громадську забудову, промислову забудову, складську забудову, транспортну інфраструктуру, зелені насадження, рекреаційні зони.

Частка забудованих земель становить близько 64 % від загальної площі території міста, 27 % території міста займає житлова забудова. Значну частку території міста займають внутрішні води – 18 %, а також зелені і лісові насадження – 10 %. Промислова зона займає площу близько 3,0 тис. га (майже 9 % території міста) – понад 700 підприємств, об'єднаних у 28 промислових районів. Унаслідок історичного розростання міста значну частину промислових районів було поглинуто міською забудовою [12].

Наразі в Дніпрі кількість вільних земельних ділянок, які можуть бути використані для створення доступного житла, є дуже обмеженою.

Разом із тим, аналіз територіальних ресурсів м. Дніпро для потреб житлового будівництва дозволив встановити, що наразі частина міських територій використовується неефективно, а саме: деякі промислові території, які перебувають у занедбаному стані.

В умовах мінливого зовнішнього середовища та жорсткої конкуренції деякі промислові підприємства збанкрутували, а їх будівлі не використовуються за первісним функціональним призначенням. До основних причин, що спричинили таку ситуацію, можна віднести:

- низький рівень використання наукового потенціалу при виробництві промислової продукції;

- використання фізично і морально застарілого промислового обладнання, яке характеризується високими витратами енергетичних і матеріальних ресурсів і, як результат, неконкурентоспроможна продукція.

Це обумовлює доцільність зміни функціонального призначення таких об'єктів, що призведе як до розкриття потенціалу цих територій, так і поліпшення соціально-економічної та екологічної ситуації в місті.

Здійснення реконструктивних заходів зі зміною функціонального призначення деградованих промислових будівель потребує залучення інвестицій і підтримки з боку органів місцевого самоврядування.

Стратегією розвитку м. Дніпро передбачено, що місто має розвиватися за таким основним напрямками, як інноваційність, комфортність та ідентичність [12].

Згідно з [12], подальший успішний розвиток Дніпра залежить від адекватного та вчасного реагування на сучасні виклики, пов'язані передусім із складною економічною ситуацією та наближенням лінії розмежування воєнних дій, які можуть викликати зменшення привабливості міста, підсилення міграції населення, релокації виробництв до інших міст та областей. Відповідно стратегічний розвиток м. Дніпро може бути забезпечений завдяки проектуванню майбутнього на основі розвитку космічного, медичного та освітнього кластерів, сфери послуг, ІТ-технологій, будівельної галузі, з поліпшенням екологічної ситуації, покращенням безпечності та інклюзивності.

Стратегічні напрямки майбутнього розвитку м. Дніпро пов'язані з його історичним минулим, адже місто сформувалось на перетині важливих товарно-транспортних шляхів як великий промисловий центр.

На сьогодні місто Дніпро перетворилось також на східний форпост України.

Розвиток промислового комплексу м. Дніпро залежить від багатьох факторів, зокрема від економічних умов, воєнно-політичної ситуації в країні, наявності інвестицій, зокрема для модернізації промислових підприємств.

SWOT-аналіз розвитку м. Дніпро дозволив виявити його сильні та слабкі сторони, а також загрози та можливості з боку зовнішнього середовища (табл. 1).

Як свідчать результати SWOT-аналізу, ревіталізація промислових територій розглядається як відкриття нових можливостей для розвитку м. Дніпро.

Мова йде про ті промислові підприємства, розташовані в межах м. Дніпро, які, знизивши обсяги виробництва в кілька разів або взагалі зупинивши виробництво продукції, займають великі земельні ділянки, забудовані промисловими будівлями та спорудами, наразі не використовуваними у виробничих цілях.

Згідно з [13], в м. Дніпро нараховується 553,0 га територій промислового призначення, які на теперішній час не використовуються.

Тому такі території можна:

1. Залишити з існуючим функціональним призначенням:

- залишити невикористовувані зараз промислові території без зміни їх функціонального призначення для розвитку промисловості і складського господарства на перспективу;

2. Частково зберегти існуюче промислове функціональне призначення:

- перепрофілювати і збільшити обсяги виробництва високотехнологічної, конкурентоспроможної та екологічно чистої продукції;

- створити на індустріальні парки;

3. Змінити функціональне призначення:
– щодо тих підприємств, які неефективно використовують земельні ділянки, застосовують екологічно небезпечні технології, забруднюють навколишнє середовище в місті, є хронічно збитковими, які не змогли пристосуватися до роботи в сучасних ринкових умовах і при

цьому припинили виробничу діяльність, а значну частину виробничих площ та територій надають в оренду, здійснити їх реконструкцію зі зміною функціонального призначення на основі принципів ревіталізації (під житлово-цивільну забудову, створення зелених зон тощо).

Таблиця 1

SWOT-аналіз розвитку м. Дніпро

Сильні сторони	Слабкі сторони
Вдале географічне розташування	Близькість до зони безпосередніх бойових дій
Забезпеченість кваліфікованими трудовими ресурсами	Відтік частини трудових ресурсів до умовно безпечних областей
Наявність фахівців IT-галузі, креативних технологій	Невисокий попит на наукоємну продукцію
Помірний клімат	Малородючість ґрунтів
Відмова від застарілих промислових технологій	Занедбані промислові території
Імідж промислового центру	Зношеність основних фондів промислових підприємств
Стартапи	Відсутність іноземних інвестицій
Наявність ділових спільнот, концентрація капіталу	Низька престижність робітничих професій
Можливості	Загрози
Транспортний потенціал	Вплив загрози безпосередніх воєнних дій на інвестиційну привабливість
Корисні копалини	Техногенні загрози
Зростання продуктивності праці на основі новітніх технологій	Скорочення населення
Інвестиції в освіту	Зменшення народжуваності
Освоєння схилів балок, підземного простору для розвитку міста без розширення існуючих меж	Глобальні кліматичні зміни, збитки через можливі зсуви ґрунту тощо
Ревіталізація промислових територій	Проблема утилізації промислових відходів
Застосування новітніх технологій	Високі відсотки по банківських кредитах
Залучення інвесторів	Загроза застосування застарілих виробничих технологій
Мобільність науковців	Закритість національних досліджень
Доступ до ринків Європейського Союзу для середнього і малого бізнесу	Корупція, низький рівень соціальної відповідальності бізнесу

При реалізації реконструктивних заходів щодо занедбаних промислових будівель на основі принципів ревіталізації передбачається:

- знесення фізично та морально зношених будівель;
- освоєння підземного простору;
- підвищення поверховості будівель;
- створення чітких функціональних зон всередині будівлі;
- максимальне використання існуючої інфраструктури;
- підвищення рівня енергоефективності будівель;
- благоустрій та озеленення території;

– забезпечення архітектурної виразності забудови;

– забезпечення пізнаваності ревіталізованого об'єкту серед населення та гостей міста [14].

До переваг ревіталізації занедбаних промислових будівель можна віднести такі:

- вища ефективність та раціональне використання земель;
- наявність об'єктів інфраструктури, адже промислові зони мають розвинену дорожньо-транспортну інфраструктуру, системи водопостачання, водовідведення, електропостачання тощо; це робить

промислові зони інвестиційно привабливими для редевелопменту;

– якщо зносити такі об’єкти, які при цьому ще мають значний залишковий ресурс, це призведе до утворення великої кількості будівельних відходів; натомість ревіталізації промислових будівель і їх подальше використання за іншим функціональним призначенням може розглядатися як ефективний спосіб зменшити кількість будівельних відходів;

– збереження містобудівної спадщини: українці все більше усвідомлюють необхідність збереження власної історії, а ревіталізація промислових будівель шляхом зміни їх функціонального призначення є ефективним кроком у напрямку збереження унікальної індустріальної спадщини та неповторності міста.

Водночас реалізація проєктів редевелопменту на основі принципів ревіталізації потребує подолання певних викликів:

- велика кількість власників;
- незаконні користувачі, які незаконно використовують простір і створюють виклики для законної ревіталізації;

– зростання цін. Оскільки девелопери стають більш обізнаними про потенціал редевелопменту та майбутні вигоди, вони, ймовірно, будуть більш проактивно підходити до викупу приміщень у промислових будівлях, що призведе до зростання їх вартості;

– обмеження, що накладаються будівельними нормами.

Перспективними є проєкти ревіталізації промислових будівель, якими передбачається створення індустріальних парків, орієнтованих на інновації та креативні індустрії.

При прийнятті рішень щодо реконструкції промислової нерухомості на основі принципів ревіталізації, окрім місця розташування та початкового функціонального призначення, потрібно враховувати такі специфічні характеристики, як:

- наявність зручних під’їздів до приміщень;
- наявність місць для паркування і вільного руху автотранспорту;
- висота приміщень;
- наявність комунікацій, їх параметри та технічний стан.

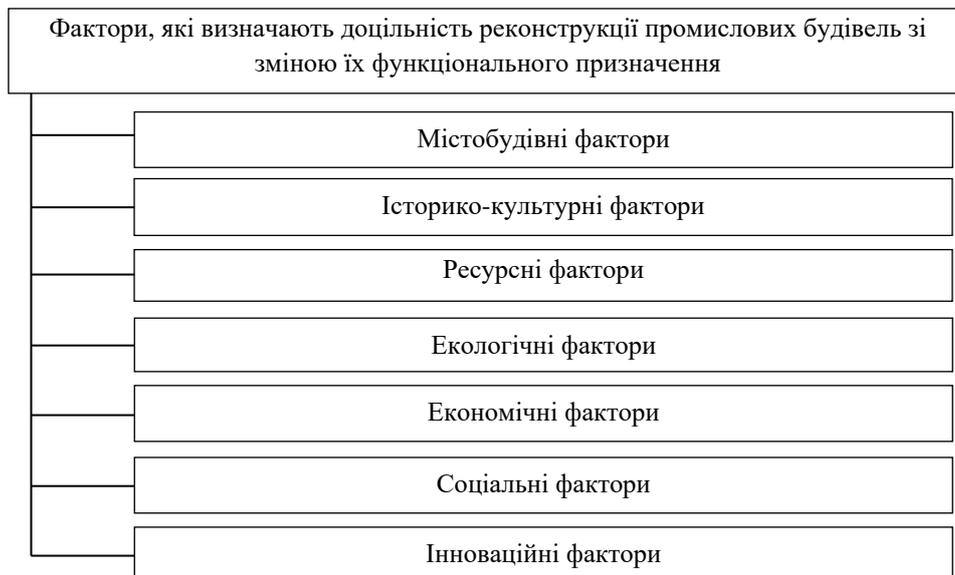


Рис. 2. Фактори, які визначають доцільність реконструкції промислових будівель на основі принципів ревіталізації

На основі аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду реконструкції промислових будівель зі зміною функціонального призначення, дослідження

втілених проєктів ревіталізації виявлено множини факторів, які визначають доцільність реконструкції промислових будівель зі зміною функціонального

призначення для подальшого сталого розвитку міст (рис. 2):

- містобудівні фактори, пов'язані з територіальним розміщенням промислових об'єктів в межах міста, віддаленістю від центральної частини міста, віддаленістю від основних автомагістралей;

- історико-культурні фактори, пов'язані зі збереженням пам'яток архітектури, промислових пам'яток міста;

- ресурсні фактори, пов'язані з природним та техногенним ландшафтом, наявністю на таких територіях водойм, зелених насаджень тощо;

- екологічні фактори, пов'язані з рівнем забруднення шкідливими речовинами;

- економічні фактори, пов'язані з конкретним функціональним призначенням об'єкту, виходячи з його економічної доцільності;

- соціальні фактори, пов'язані з «вбудовуванням» колишніх промислових будівель і території після зміни їх функціонального призначення в життєдіяльність міста;

- інноваційні фактори, пов'язані з інноваційними матеріалами, технікою та технологіями, що сприяють енергоефективності, екологічності, сталості будівель.

Висновки

Одним із вирішальних факторів щодо проєктів редевелопменту на основі принципів ревіталізації є виявлення незавантажених і неефективно використовуваних промислових будівель та забезпечення ефективного і гнучкого використання обмежених земельних ресурсів, пристосовуючи їх до мінливої економіки сучасних міст. Для досягнення цієї мети потрібно виконати критичний аналіз поточних потреб розвитку міст і використовувати ревіталізовані простори для цих потреб.

Але не всі промислові будівлі можуть бути використані для інших цілей. Потрібно зважати на вимоги будівельних норм, а також на особливості сусідніх територій.

Одним із можливих способів ревіталізації промислових будівель є їх реконструкція під житлову функцію. Відповідно це потребує визначення конкретних об'єктів, які відповідають чинним нормативним вимогам до житла. Адже є промислові будівлі, які придатні до використання як житло, а деякі промислові будівлі не можуть бути використані під житлову функцію. До того ж, зважаючи на сьогоднішній попит на доступне житло, потрібно вирішити питання щодо того, яке саме житло буде створюватися в результаті ревіталізації.

При ревіталізації промислових будівель особливу увагу слід приділяти сталості будівель, зважаючи на турботу про довкілля та долю майбутніх поколінь, а також орієнтацію будівельної галузі на створення екологічно дружніх об'єктів.

Ревіталізація промислових будівель є прикладом сталої практики в будівництві, проте для девелоперів першочерговими інтересами залишаються безпосередні витрати та вигоди за проєктом. Оскільки стале будівництво зазвичай потребує додаткових витрат, для його стимулювання на державному рівні можна розглядати різні варіанти зниження податків на майно тощо. Це може виявитися гарним стимулом та винагородою як для девелоперів, так і для користувачів таких об'єктів.

При дослідженні девелоперських проєктів ревіталізації промислових будівель з'ясувалось, що найбільше сприяє реалізації таких проєктів усвідомлення факту дефіциту вільних земельних ділянок для будівництва. Таким чином, що більшим є у містах дефіцит вільних земельних ділянок, то більшою є увага до деградованих промислових зон із наступною їх ревіталізацією.

Індустріальний парк є одним із затребуваних форматів на ринку виробничої та складської нерухомості. Місцем розташування створюваних індустріальних парків у 40 % випадків обирається ревіталізована промислова нерухомість. Інтерес з боку девелоперів до таких проєктів обумовлений попитом з боку резидентів та

підтримкою з боку держави у вигляді фінансування та пільг.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року : Закон України від 28 лютого 2019 року № 2697-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19>
2. Про регулювання містобудівної діяльності : Закон України від 17 лютого 2011 р. № 3038-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17>
3. Про Концепцію сталого розвитку населених пунктів : Постанова Верховної Ради України від 24 грудня 1999 р. № 1359-XIV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1359-14#Text>
4. Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на 2021–2027 роки : Постанова Кабінету Міністрів України від 5 серпня 2020 р. № 695. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-п>
5. Kusiak J. Revitalizing urban revitalization in Poland : Towards a new agenda for research and practice. *Urban Development Issues*. 2019. Vol. 63. Pp. 17–23.
6. Parysek Jerzy J. Urban revitalization in Poland : problems, dilemmas, challenges and hopes. *Journal of the Polish Academy of Sciences*. 2017. Vol. 50. Pp. 103–121. DOI: 10.12657/studreg-50-06.
7. Revitalization of urban industrial heritage from a perspective of spatial production theory : the case study of «Old market» project. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13467581.2024.2396618>
8. Дослідження ринку нерухомості України. URL: <https://olimp.net.ua/wp-content/uploads/58-.pdf>
9. Індустріальні парки 2024. URL: https://madeinukraine.gov.ua/industrialni_parky_2024.pdf
10. Індустріальні парки України: підсумки 2024 року. URL: https://propertytimes.com.ua/industrialnaya_nedvizhmost/industrialni_parki_ukrayini_pidsumki_2024_roku
11. Сучасні тенденції потенціалу для інвестицій в нерухомість : роздуми про зміни і переформатування. URL: <https://brdo.com.ua/top/suchasni-tendentsiyi-potentsialu-dlya-investytsij-v-neruhomist-rozdumy-pro-zminy-pereformatuvannya/>
12. Стратегія розвитку міста Дніпра «Стратегія Дніпра 2030». URL: https://dniprorada.gov.ua/upload/editor/strategiya_osnovnij_dokument_1.pdf
13. Внесення змін до генерального плану м. Дніпро. Основні положення. URL: https://dniprorada.gov.ua/upload/editor/dnipro_2024_op.pdf
14. Кравчуновська Т. С., Броневицький С. П., Разумова О. В., Ковальов В. В. Аналіз ресурсів для потенційної вторинної забудови та комплексної реконструкції міських територій. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. Серія: Інноваційні технології життєвого циклу об'єктів житлово-цивільного, промислового і транспортного призначення*. 2016. Вип. 91. С. 70–76.

REFERENCES

1. *Pro Osnovni zasady (strategiiu) derzhavnoi ekolohichnoi polityky Ukrainy na period do 2030 roku : Zakon Ukrainy vid 28 liutoho 2019 r. № 2697-VIII* [On the Basic Principles (Strategy) of Ukraine's State Environmental Policy for the Period until 2030 : Law of Ukraine of 28 February 2019, № 2697-VIII]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19> (in Ukrainian).
2. *Pro rehuliuivannia mistobudivnoi diialnosti : Zakon Ukrainy vid 17 liutoho 2011 r. № 3038-VI* [On the regulation of urban development activities : Law of Ukraine of 17 February 2011, № 3038-VI]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17> (in Ukrainian).
3. *Pro Kontseptsiuu staloho rozvytku naselennykh punktiv: Postanova Verkhovnoi Rady Ukrainy vid 24 hrudnia 1999 r. № 1359-XIV* [On the Concept of Sustainable Development of Human Settlements: Resolution of the Verkhovna Rada of Ukraine of 24 December 1999, № 1359-XIV]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1359-14#Text> (in Ukrainian).
4. *Pro zatverdzhennia Derzhavnoi strategii rehionalnoho rozvytku na 2021–2027 roky : Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 5 serpnia 2020 r. № 695* [On Approval of the State Strategy for Regional Development for 2021–2027 : Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 695 of 5 August 2020, № 695]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-п> (in Ukrainian).
5. Kusiak J. Revitalizing urban revitalization in Poland : Towards a new agenda for research and practice. *Urban Development Issues*. 2019, vol. 63, pp. 17–23.
6. Parysek Jerzy J. Urban revitalization in Poland : problems, dilemmas, challenges and hopes. *Journal of the Polish Academy of Sciences*. 2017, vol. 50, pp. 103–121. DOI: 10.12657/studreg-50-06.
7. Revitalization of urban industrial heritage from a perspective of spatial production theory : the case study of “Old market” project. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13467581.2024.2396618>
8. *Doslidzhennia rynku nerukhomosti Ukrainy* [Research on the Ukrainian real estate market]. URL: <https://olimp.net.ua/wp-content/uploads/58-.pdf> (in Ukrainian).
9. *Industrial'ni parky 2024 roku* [Industrial parks 2024]. URL: https://madeinukraine.gov.ua/industrialni_parky_2024.pdf (in Ukrainian).

10. *Industrial'ni parky Ukrainy: pidsumky 2024 roku* [Industrial parks of Ukraine : results of 2024]. URL: <https://propertytimes.com.ua/industrialnaya-nedvizhmost/industrialni-parki-ukrayini-pidsumki-2024-roku> (in Ukrainian).
11. *Suchasni tendentsiyi potentsialu dlya investytsiy v nerukhomist' : rozdumy pro zminy i pereformatuvannya* [Current trends in real estate investment potential : reflections on change and reformatting]. URL: <https://brdo.com.ua/top/suchasni-tendentsiyi-potentsialu-dlya-investytsij-v-neruhomist-rozdumy-pro-zminy-pereformatuvannya/> (in Ukrainian).
12. *Stratehiya rozvytku mista Dnipra "Stratehiya Dnipra 2030"* [Dnipro City Development Strategy "Dnipro Strategy 2030"]. URL: <https://dniprorada.gov.ua/upload/editor/strategiya-osnovnij-dokument-1.pdf> (in Ukrainian).
13. *Vnesennya zmin do heneral'noho planu m. Dnipro. Osnovni polozhennya* [Amendments to the master plan of the city of Dnipro. Main provisions]. URL: <https://dniprorada.gov.ua/upload/editor/dnipro-2024-op.pdf> (in Ukrainian).
14. Kravchunovska T.S., Bronevytskyi S.P., Razumova O.V. and Kovalov V.V. *Analiz resursiv dlia potentsiinoi vtorynnoi zabudovy ta kompleksnoi rekonstruktsii misykykh terytorii* [Analysis of resources for potential secondary development and complex reconstruction of urban areas]. *Budivnytstvo, materialoznavstvo, mashynobuduvannya. Seriya: Innovatsiini tekhnologii zhyttievoho tsykladu ob'ektiv zhytlovo-tyvilnoho, promyslovoho i transportnoho pryznachennia* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering. Series : Innovative Technologies for the Life Cycle of Residential, Civil, Industrial and Transport Facilities]. 2016, iss. 91, p. 70–76. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 29.09.2025.

УДК 004.414.6:628.423.7

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.241225.17.1205

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСОНАЛЬНОГО ШУМОЗАХИСТУ НА БУДІВЕЛЬНОМУ МАЙДАНЧИКУ

БЕСПАЛОВА А. В.¹, *докт. техн. наук, проф.*,

КНИШ О. І.², *канд. техн. наук, доц.*,

ДАШКОВСЬКА О. П.^{3*}, *канд. техн. наук, доц.*,

ФАЙЗУЛИНА О. А.⁴, *канд. техн. наук, доц.*

¹ Кафедра організації будівництва і охорони праці, Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідрихсона, 4, 65029, Одеса, Україна, тел. +38 (097) 397-72-52, e-mail: bespalovaav@odaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-3713-0610, Scopus Author ID: 57204469418

² Кафедра організації будівництва і охорони праці, Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідрихсона, 4, 65029, Одеса, Україна, тел. +38 (073) 746-02-37, e-mail: knyshei@odaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-3449-4112, Scopus Author ID: 57204469418

^{3*} Кафедра організації будівництва і охорони праці, Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідрихсона, 4, 65029, Одеса, Україна, тел. +38 (067) 983-89-00, e-mail: dashkovskayaop@odaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9980-023X

⁴ Кафедра організації будівництва і охорони праці, Одеська державна академія будівництва та архітектури, вул. Дідрихсона, 4, 65029, Одеса, Україна, тел. +38 (073) 437-48-70, e-mail: faizulinaoa@odaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1151-4467

Анотація. Шумове забруднення від будівельної діяльності є основним фактором, що загрожує здоров'ю працівників, а також середовищу проживання людей. Однак попередні дослідження в основному зосереджувалися на зменшенні шумового забруднення навколо чутливих будівель за межами будівельного майданчика, а не для працівників на будівельному майданчику. Більше того, наявні наразі методи зменшення шуму, як правило, є пасивними та супроводжуються значними додатковими витратами. Оскільки розташування об'єктів є критичним фактором шумового забруднення, це дослідження намагається проаналізувати, як можна зменшити шумове забруднення для працівників шляхом оптимізації використання існуючих та впровадження інноваційних персональних шумозахисних систем (ПШЗС). Враховуючи, що зменшення шуму шляхом використання існуючих та впровадження інноваційних ПШЗС може негативно вплинути на безпеку та витрати, бажане використання ПШЗС повинно встановлювати баланс між зниженням шуму, покращенням безпеки та контролем витрат. Тому розроблено функції, що враховують потенційний ризик безпеки та транспортні витрати, що виникають внаслідок взаємодії між суб'єктами виробництва на будівельному майданчику. Була зібрана та оброблена інформація про рівень впливу шуму; та дані про використання ПШЗС; про використання ПШЗС на робочих місцях та поза робочим часом. Крім того, було виміряно ослаблення шуму, що забезпечується ПШЗС у працівників на робочому місці. За даними опитувань, ПШЗС після роботи використовували нечасто. Аналіз поєднання результатів безперервних вимірювань впливу шуму, і даних про використання ПШЗС показав, що фактично ПШЗС послабили вплив шуму менше ніж на 2 дБ. Це незначна величина, якщо врахувати те, що рівень вплив шуму в цій галузі дуже велике. Отримані результати показують, що програми захисту від шуму повинні виконуватися більш повно і ретельно; і що слід приділяти більше уваги зменшенню шуму на робочих місцях будівельників. Запропонована дослідницька структура може бути використана як орієнтир для збалансування суперечливих цілей сталого розвитку також і на інших промислових об'єктах. Оцінити ефективність існуючих та запровадити інноваційні системи захисту слуха робітників, що обслуговують механізоване устаткування на будівельних виробничих ділянках. На думку робітників ПШЗС не завжди допомагає зробити шум тихіше. В середньому ПШЗС знижують шум менше, ніж на 3 дБ, та при гучності понад 85дБа ПШЗС допомагають в 20 % випадків. Щоб ПШЗС застосовували частіше, треба навчити робітників правильно користуватися ПШЗС і зробити так, щоб вони були доступні і працювали як треба. Але навіть після навчання із захисту слуху 25 % будівельників все одно не надягають захист. Це підтверджується дослідженнями у світі. Вони з'ясували, що ставлення будівельників до захисту слуху не змінюється швидко. Щоб вирішити проблему, потрібно придумати прості та ефективні колективні засоби захисту від шуму під час будівництва.

Ключові слова: *ослаблення шуму; будівництво; збереження слуху; захист від шуму; вплив шуму*

RESEARCH OF PERSONAL NOISE PROTECTION ON A CONSTRUCTION SITE

BESPALOVA A.V.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

KNYSH O.I.², *PhD, Assoc. Prof.*,

DASHKOVSKA O.P.^{3*}, *PhD, Assoc. Prof.*,
FAYZULYNA O.A.⁴, *PhD, Assoc. Prof.*

¹ Department Organization of Construction and Labor Protection, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4, Didrichsona, Odesa, 65029, Ukraine, tel. +38 (097) 397-72-52, e-mail: bespalovaav@odaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-3713-0610, Scopus Author ID: 57204469418

² Department Organization of Construction and Labor Protection, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4, Didrichsona, Odesa, 65029, Ukraine, tel. +38 (073) 746-02-37, e-mail: knysnoi@odaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-3449-4112, Scopus Author ID: 57204469418

^{3*} Department Organization of Construction and Labor Protection, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4, Didrichsona, Odesa, 65029, Ukraine, tel. +38 (067) 983-89-00, e-mail: dashkovskayaop@odaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9980-023X

⁴ Department Organization of Construction and Labor Protection, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 4, Didrichsona, Odesa, 65029, Ukraine, tel. +38 (073) 437-48-70, e-mail: faizulinaoa@odaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-1151-4467

Abstract. Noise pollution from construction activities is a major factor that threatens the health of workers, as well as the environment of people. However, previous research has mainly focused on reducing noise pollution around sensitive buildings outside the construction site, rather than for workers on the construction site. Moreover, currently available noise reduction methods tend to be passive and are accompanied by significant additional costs. Since the location of facilities is a critical factor in noise pollution, this study attempts to analyze how it is possible to reduce noise pollution for workers by optimizing the use of existing and innovative personal noise protection systems (PNPS). Given that noise reduction through the use of existing and innovative PSUs can negatively affect safety and costs, the preferred use of PNPS should strike a balance between noise reduction, safety improvement, and cost control. Therefore, functions have been developed that take into account the potential safety risk and transportation costs that arise as a result of interaction between production entities on the construction site. Information on the level of noise exposure was collected and processed; and data on the use of PNPS; on the use of PNPS in the workplace and outside of working hours. In addition, the noise attenuation provided by PSHS in employees in the workplace was measured. According to surveys, PNPS was used infrequently after work. Analysis of the combination of the results of continuous measurements of noise exposure and data on the use of PNPS showed that in fact PNPS reduced the influence of noise by less than 2 dB. This is a small amount, given that the level of noise exposure in this area is very high. The results show that noise protection programs should be implemented more fully and carefully; and that more attention should be paid to noise reduction in construction workers' workplaces. The proposed research framework can also be used as a reference point for balancing conflicting Sustainable Development Goals at other industrial facilities. Evaluate the effectiveness of existing and introduce innovative hearing protection systems for workers servicing mechanized equipment at construction production sites. According to the workers of the PSZS, it does not always help to make the noise quieter. On average, PNPS reduce noise by less than 3 dB, and at a volume of more than 85 dB, PSUs help in 20 % of cases. In order for PNPS to be used more often, it is necessary to teach workers how to use PSZS correctly and make sure that they are accessible and work as they should. But even after hearing protection training, 25 % of construction workers still don't wear protection. This is confirmed by research in the world. They found that the attitude of builders to hearing protection does not change quickly. To solve the problem, you need to come up with simple and effective collective means of protecting against noise during construction.

Keywords: *noise reduction; construction; hearing preservation; noise protection; noise exposure*

Постановка проблеми. Будівельна галузь є однією з найбільших як у країнах, що розвиваються, так і в розвинених країнах. Сталий розвиток будівельної галузі є життєво важливим і привертає значну увагу як дослідників, так і практиків. Будівельна галузь є складною, диверсифікованою та динамічною, що охоплює різноманітну будівельну діяльність [1]. Шумове забруднення, спричинене проведенням будівельних робіт, є однією з ключових перешкод для сталого розвитку в будівельному секторі. Шумове забруднення

не тільки порушує природне середовище навколо будівельного майданчика (тобто, екологічний шум), але й негативно впливає на працівників на будівельному майданчику [2]. Потенційні ризики включають втрату голосу, нечітку мову, проблеми зі слухом, стрес, втрату концентрації, гіпертонію, підвищений кров'яний тиск, вплив на імунну систему, біохімічні ефекти, серцево-судинні захворювання, роздратування, проблеми зі сном і захворювання судинної системи [3]. Крім того, кілька досліджень також показали зниження продуктивності праці

працівників через вплив шуму від будівельної техніки.

Таким чином, ці ризики, пов'язані з шумовим забрудненням, стали причиною уповільнення зростання валового внутрішнього продукту в багатьох країнах світу.

Аналіз останніх публікацій. Багато досліджень показали, що надмірний вплив шуму створює кілька потенційних ризиків для працівників на будівельному майданчику, що вказує на важливість впровадження управління будівельним шумом. У будівельній сфері рівень шуму протягом робочої зміни може бути досить високим, щоб використовувати засоби колективного захисту. Однак в існуючих програмах захисту від шуму основним засобом є ПШЗС.

На жаль, працівники будівельної галузі не завжди усвідомлюють небезпеку впливу шуму та інших шкідливих факторів на виробництві [4], і навчання охороні праці в цій сфері проводиться нечасто [5]. Особливо це стосується програм захисту від шуму, які в будівельній галузі розробляються і реалізуються порівняно рідко [6]. Дослідження, проведені раніше, продемонстрували, що рівень шуму, з яким стикаються співробітники різних будівельних підприємств і галузей при виконанні різних завдань, часто перевищує допустимі норми в 80 дБА (гранично допустимий рівень шуму в Україні, рекомендований). Результати вимірювань рівня шуму при виконанні різних робіт і використанні різних інструментів показали, що в деяких випадках рівень шуму може бути значним. Вперше випадки розвитку нейросенсорної приглухуватості були зафіксовані у працівників деяких будівельних спеціальностей більше трьох десятиліть тому, і це захворювання залишається поширеним в будівельній галузі. Оскільки для захисту від шуму частіше використовуються індивідуальні, а не колективні засоби захисту, основну відповідальність за захист від шуму несуть самі працівники. Невідомо, наскільки ефективно застосування засобів захисту від

шуму знижує вплив шуму на працівників. Для цього не можна використовувати показник ослаблення шуму, отриманий при сертифікації і наноситься на упаковку (в ЄС – SNR) [7].

Результати дослідження. Описані тут дані були зібрані у будівельних робітників, найнятих різними підрядниками на багатьох об'єктах в місті Одеса, Україна результати опитувань були отримані у працівників, які брали участь в трирічному (2018–2021) дослідженні, в якому вивчався вплив шуму і погіршення слуху у будівельників-стажерів. Працівники відповідали на питання перед початком дослідження (базовий опитування), і потім до 3 разів при проведенні щорічних опитувань. У дослідженні брали участь оператори наступних будівельних машин та устаткування: пневматичний перфоратор, ввідбійний молоток, шліфувальна машина дискова, прес-ножиці комбіновані, лебідкаа електричнаа, машина дискова відрізна, аавтоавантажувачі, вібратори поверхневі, бадді з міксерами електричні, вібратори глибинні. Додаткова інформація, описана в цій статті, була зібрана У інших будівельників-операторів, зокрема кранівників, і у різноробочих, які не брали участі в цьому дослідженні, але працювали на тих же будівництвах (що і учасники трирічного дослідження) в різний час в період 2018–2021 рр. Дані про вплив шуму і використання ПШЗС, зібрані у працівників, збір інформації про вплив шуму і про використання ПШЗС проводився одночасно протягом всієї зміни. Заміри проводилися з жовтня 2018 до березня 2021. Під час роботи будівельники носили з собою записуючий пристрій, шумомір (MASTECH MS6701), яке реєструвало рівень шуму з інтервалом в 1 хвилину. Цей пристрій було відрегульовано для запису даних відповідно до певних налаштувань.

Під час щорічних опитувань учасників запитували не лише про те, як на них впливає виробничий шум та чи використовують вони ПШЗС на робочому місці, а й про те, як на них впливає шум після роботи. Також у щорічному

опитуванні учасників запитували, чи піддаються вони сильному впливу шуму після роботи, наприклад, через використання транспорту, розваг, галасливого інструменту або потужних машин. Крім того, їх запитували, чи використовують вони в таких випадках ПШЗС. В ході дослідження проводилося кількісне вимірювання зниження рівня шуму на робочих місцях, де використовувалися ПШЗС. Так як для перевірки використовуються навушники, то за допомогою цієї системи виробничого контролю можна вимірювати ослаблення шуму тільки у вкладишів. Для того, щоб порівняти виміряні величини ослаблення (PAR) з ослабленням, отриманим при сертифікаційних випробуваннях в лабораторних умовах, значення NRR перерахували, використовуючи лише ті значення вимірів в лабораторних умовах, які проводили на тих же частотах, що і виміри PAR на робочих місцях. В середньому через такого перерахунку значення NRR могло змінитися на 1 дБ. Були обчислені середні відкориговані NRR; для підгруп ПШЗС і для всіх разом визначили показники ефективності у працівників PAR для кожного вуха окремо, і для обох разом.

Корекція середньозмінного еквівалентного рівня шуму враховує використання ПШЗС і виміряне у працівників ослаблення шуму. Для обчислення еквівалентного рівня шуму, що впливав на працівників при не застосуванні ПШЗС, використовували результати щохвилинних вимірів шуму протягом зміни. Обчислення проводили за допомогою рівняння 1:

$$TW_{Ai} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{\sum_{k=1}^{ni} (10^{\frac{Li}{10}})}{480} \right], \quad (1)$$

де k – номер однохвилинного інтервалу часу у зміні, Li – середньозмінний рівень змінного шуму з корекцією А L_{eq} average для хвилинного інтервалу часу для респондента i , та ni – номер однохвилинного періоду під час проведення вимірів. Ефект зниження шумового навантаження на робітників, що використовують ПШЗС представлений рівнянням:

$$TW_{Ai} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{\sum_{k=1}^{nihp} (10^{\frac{Li-Ha}{10}}) + \sum_{k=1}^{nihp} (10^{-\frac{Li}{10}})}{480} \right], \quad (2)$$

де k – однохвилинний інтервал ПШЗС, Li – еквівалентний рівень шуму впродовж 1 хвилини з А-корекцією, $nihp$ – вилін захисту робітника ПШЗС, Ha – середнє послаблення рівня шуму а $nihp$ – час простою ПШЗС. Також були обчислені середні арифметичні і стандартні відхилення для значень відмінності (відповідних індивідуальних) середньозмінних еквівалентних рівнів шуму з і без ПШЗС: ($TW_A - TW_{AprotProt}$, для одного й того ж виміру). Тобто визначили середні значення і стандартні відхилення ефективності захисту, у працівників різних професій, і у всіх разом.

За результатами польових досліджень на дільницях встановлено, що середній рівень шуму становить вище за 80 і 85 дБА. У операторів машини дискової відрізної рівень шуму був від 77,9 до 84,6 дБА. У робітників інших професій рівень шуму був від 80 до 82 дБА. Загалом, шум був вище 85 дБА 30 % часу, коли ми його вимірювали. Під час роботи використовували спеціальні захисні навушники і вкладиші. Але лише 17 % часу працювали в них. А коли рівень шуму перевищував 85 дБА, то використовували навушники і вкладиші майже однаково. Співробітники стверджують, що в середньому використовували навушники і вкладиші 16 % часу. При цьому навушники використовували 95 % часу, а вкладиші – 5 %. Оператор бадді з міксерами електричної найбільше страждали від шуму. Вони проводили приблизно половину робочого часу в шумі голосніше 80 дБА. А оператор відбійного молотка, у яких рівень шуму був більше, ніж у оператора автотранспортувача, найменше використовували захист від шуму. Вони використовували її менше 10 % часу, коли шум був голосніше 80 або 85 дБА. Ми запитували співробітників, які брали участь у дослідженні, як часто вони використовують ПШЗС. Результати ми записали в таблиці 2. Більшість

співробітників сказали, що використовують ПШЗС часто. Деякі сказали, що використовують рідко або взагалі не використовують. Серед робітників, які займаються ізоляцією і бетонуванням, найбільше тих, хто рідко або зовсім не використовує ПШЗС. Серед слюсарів, теслярів і електриків найбільше тих, хто іноді використовує ПШЗС. Серед робітників, які займаються експлуатацією, покрівлею і кладкою, найбільше тих, хто завжди використовує ПШЗС. Ми порівняли, як часто робітники використовують ПШЗС. Для цього ми подивилися на результати опитувань, які проводилися щороку, і на результати, які ми отримали під час роботи. Ми порівняли їх з результатами вимірів шуму. Робітники різних професій по-різному повідомляли про використання ПШЗС. Наприклад, оператори лебідки електричної говорили, що використовують ПШЗС іноді. Але насправді вони використовували їх весь час, коли шум був вище 80 дБА. А слюсарі і робітники по ізоляції говорили, що завжди використовують ПШЗС. Але вони насправді не використовували їх, коли шум був вище 80 дБА. Виявилося, що ПШЗС використовують рідко. Майже половина людей, які полюбляють гонки, завжди використовують ПШЗС. Приблизно третина не використовує ПШЗС. Дві третини людей, які користуються шумними інструментами після роботи, рідко використовують ПШЗС або взагалі не використовують. Майже всі робітники, які ходять на концерти, танці або спортивні заходи, не використовували ПШЗС. Досліджено зменшення шуму на робочих місцях 44 робітників на 4 будівництвах: оператор шліфувальної машина дискової, оператор прес-ножиців комбінованих, оператор пневматичного перфоратора, оператор шліфувальної машини дискової. Ми вибрали тих робітників, що завжди носять ПШЗС. Але коли ми прийшли перевірити їх, 26 з 44 не носили ПШЗС. І ніхто з них не носив ПШЗС на будівництві. У цих робітників, що завжди використовують ПШЗС «Max», «Max Lite», «Laser Lite», «MultiMax», «Bilsom 303»,

«Bilsom 304», «Matrix Orange», «Matrix Blue», «Pilot», «SmartFit», «AirSoft», «Quie», «Clarity 656», «Fusion», «QB1HYG», «QB2HYG», «QB3HYG», «PerCap», «Laser Trak», «SmartFit Detectable», «Fusion Detectable», «Neutron», «Howard Leight DISPENSER LS400», «Howard Leight DISPENSER LS500», що надані на час проведення досліджень. У деяких моделей зробили всього лише 1–2 виміри, але для порівняння всі результати згрупували в 4 групи: «Max» (26 вимірів), «Laser Lite» (11), «Howard Leight DISPENSER LS500» (7) та «Neutron» (12). В середньому, вкладиші Howard Leight найкраще зменшують шум у вухах. У них другий за величиною показник ефективності. У інших вкладишів ефективність менше, і вони гірше зменшують шум. Різниця між найкращими і найгіршими вкладишами невелика – 1,5 дБ.

На рисунку показані дані про зменшення шуму. Вони показують, як добре різні типи вкладишів захищають від шуму на різних частотах. Всі вкладиші найкраще захищали від шуму на частоті 2 кГц, а найгірше – на 500 Гц. Дані про ослаблення шуму на різних частотах були різними. Іноді стандартне відхилення було таким же, як і середнє значення. Ослаблення шуму за допомогою різних вкладишів при одній і тій же частоті звуку трохи відрізнялося, але ця відмінність була незначною. Рівень захисту працівників, які використовують ПШЗС не постійно. Середньозмінний еквівалентний вплив шуму на працівників, якби вони не застосовували ПШЗС взагалі, в середньому було 87,4 дБА. Результати обстежень доведено у таблиці 3. А вплив шуму на будівельників, в цілому, і з урахуванням того, що вони іноді застосовують ПШЗС, і того, яке (середнє) ослаблення шуму дають самі ПШЗС (20 дБА) було нижче, ніж рівень шуму на робочому місці (тобто без ПШЗС, за даними вимірів, табл. 3) на 2,7 дБ. В цілому, середньозмінні рівні шуму (без ПШЗС) перевищували 85 дБА приблизно в 2/3 вимірах, а з урахуванням ПШЗС перевищення були трохи більше ніж в половині випадків. Застосування ПШЗС знижує частку часу, коли вплив шуму

перевищує 85 дБА, лише на 20 %. У робітників різних професій є різниця в рівні шуму на роботі. Якщо вони використовують спеціальні захисні пристрої (ПШЗС), то різниця невелика. Це означає, що ці робітники нечасто використовують ПШЗС. А у тих, хто використовує ПШЗС часто, різниця в рівні шуму більше. Завдяки ПШЗС шум став менше впливати на операторів відбійного молотка та операторів шліфувальної машина дискової. У перших він став менше на дві третини, а у других – більше ніж в два рази. А ось у електриків і слюсарів шум став найменше — менше ніж на 7 %. Щоб захистити будівельників від шуму, потрібно знати, як працюють спеціальні ПШЗС. Зібрані дані про рівень шуму на робочих місцях і про те, як часто будівельники використовували ПШЗС. Виявилось, що ПШЗС допомагають слабо. Ризик втратити слух при їх використанні все одно залишається високим. У середньому будівельники використовували ПШЗС, коли рівень шуму був вище 85 дБа, менше, ніж у чверті випадків. Будівельники різних професій використовували ПШЗС по-різному. Деякі частіше, а деякі майже не застосовували. Наприклад, рівень шуму на робочих місцях інженерів і слюсарів був приблизно однаковим, і вони використовували ПШЗС приблизно однаково часто. За даними опитувань, деякі люди використовували ПШЗС часто, а інші – рідко. Аналіз показав, що люди старше 30 років частіше говорили, що завжди використовують ПШЗС. Але різниця була невеликою, менше 10 %. У місті Чорноморську 2017 році будівельники п'яти професій використовували ПШЗС частіше, ніж у 2018 році. Це було пов'язано з деякими подіями. А робітники іншої професії різноробочі продовжували рідко використовувати ПШЗС [8].

Оператори трьох типів устаткування стверджували проте, що використовують ПШЗС, коли шум сильний, приблизно в 18–49 % випадків. Хоча вони знають, що шум шкідливий для здоров'я і погіршує слух. Оператори машини дискової відризної використовували ПШЗС частіше за інших

робітників, а оператор пневматичного перфоратора – набагато рідше. За даними опитувань, які проводилися раніше, деякі учасники нашого дослідження використовували ПШЗС в середньому 15 % часу. Це збігається з остаточними результатами нашого аналізу, який охопив багато інших будівельників. На жаль, ми не можемо точно сказати, наскільки наші дані можуть бути неточними. Щоб захистити працівників від шуму на роботі, їм видають спеціальні навушники. Але не всі будівельники їх носять.

Можливо, це відбувається тому, що навушники занадто сильно послаблюють шум, і тоді робочим важко спілкуватися. Ще одна причина-у будівельників може бути вибір між різними моделями навушників, і якщо вони незручні або занадто сильно послаблюють звук, то будівельники їх не будуть носити. Робота по поліпшенню умов праці дозволяє знизити вплив шуму на будівельників. Складніше зменшити вплив шуму на них після роботи. Було б корисно навчитися прогнозувати ступінь використання працівником ПШЗС після роботи на основі того, як він це робить під час роботи. Достовірність цієї інформації сильно залежить від точності відповідей опитуваного, і точність відповідей в частині застосування ПШЗС при опитуваннях не перевірена. Вплив частки часу використання ПШЗС на зниження впливу шуму можна описати математично, за допомогою (3), вважаючи що двократному зміни дози впливу шуму відповідає зміна рівня шуму на 3 дБ.

$$P_{eff} = 10 \cdot \log_{10} \left[\frac{100}{100 - \tau \times \left(1 - 10^{-\frac{N}{10}} \right)} \right], \quad (3)$$

де τ – час використання ПШЗС, %; а N – ступінь послаблення шуму за умов використання ПШЗС, дБ. Нехай ПШЗС послаблюють шум на 20 дБ, як це вийшло у працівників, які брали участь в нашому дослідженні, і нехай загальна частка часу використання ПШЗС не перевищує 1/3. Тоді отримаємо, що застосування ПШЗС послабить вплив шуму не більше ніж на 3 дБ. Цей результат схожий з результатом нашого аналізу. Якщо працівники будуть

використовувати 100 % часу ПШЗС, що послаблює шум на 20 дБ, то відмінність у впливах шуму при використанні ПШЗС і без них складе 20 дБА. Середній рівень захисту у працівників різних професій відрізнявся на порядок (від 0,5 дБА у електриків до 10,9 дБА у інженерів-експлуатаційників). Всі результати, представлені вище, відносяться до середньої частки часу використання ПШЗС, у всіх робітників, або у якихось підгруп працівників. Ми використали цю інформацію, щоб зрозуміти, наскільки добре працюють ПШЗС. Ми не думаємо, що в двох групах буде сильно відрізнятися, наскільки добре ПШЗС допомагають від шуму і як часто їх використовують. Але може бути, що через те, що ми використовували інформацію з

двох груп, наш результат може бути неточним. У нашому дослідженні ми порівняли результати вимірювання шуму та відповіді працівників протягом зміни (з інтервалами 15 хвилин). Виявилось, що ті працівники, які повідомляли, що використовують ПШЗС завжди, насправді використовували його приблизно третину часу, коли шум перевищував 85 дБА. Тому результати опитувань, які використовували в цьому дослідженні, можуть бути неточними, тому що люди могли відповісти неправильно.

Але спосіб, яким вимірювали шум і записували результати, був перевірений. Тому він надійний. Ці результати використовували, щоб підрахувати, наскільки шум став менше.

Таблиця 1

Вплив шуму на робітників різних професій і використання ПШЗС (за повну зміну)

Робоче місце оператора	Еквівалентний рівень шуму, дБА	Частка часу, %, в продовж якого			
		>80дБА	використано ПШЗС	>85 дБА	використано ПШЗС
пневматичного перфоратора	81,7	33	22,0	16,1	22,0
відбійного молотка	80,8	26,3	16,7	11,4	19,2
шліфувальної машина дискової	80,5	26,3	4,5	10,8	4,6
прес-ножиців комбінованих	77,9	15,0	4,3	4,5	4,5
лебідки електричної	83,2	38,8	8,7	18,6	8,9
бадді з міксерами електричної	80,6	24,0	43,3		

Таблиця 2

Використання будівельниками ПШЗС (за даними опитувань)

Робоче місце оператора	Актив опитування	Респондентів, %, що використовують ПШЗС		
		завжди	періодично	рідко або ніколи
пневматичного перфоратора	148	42,6	42,6	14,9
відбійного молотка	62	22,6	41,9	35,5
шліфувальної машина дискової	33	45,5	45,5	9,1
прес-ножиців комбінованих	36	47,2	30,6	22,2
лебідки електричної	134	43,3	41,8	14,9
бадді з міксерами електричної	155	56,8	36,1	7,1

Таблиця 3

Ослаблення шуму у працівників при використанні ними ПШЗС (PAR), дБ

Модель	NRR с корег.	Ліве вухо		Праве вухо		Обидва вуха	
		N вимірів	\underline{L}	N вимірів	\underline{L}	N вимірів	\underline{L}
«Max»	29	26	24,2	25	17,7	25	20,4
«Laser Lite»	31	11	22,4	9	25,6	9	17,6
«Howard Leight DISPENSER LS500»	27,3	7	23,3	5	17,0	5	18,9
«Neutron»	29,2	12	24,3	39	20,0	39	19,5

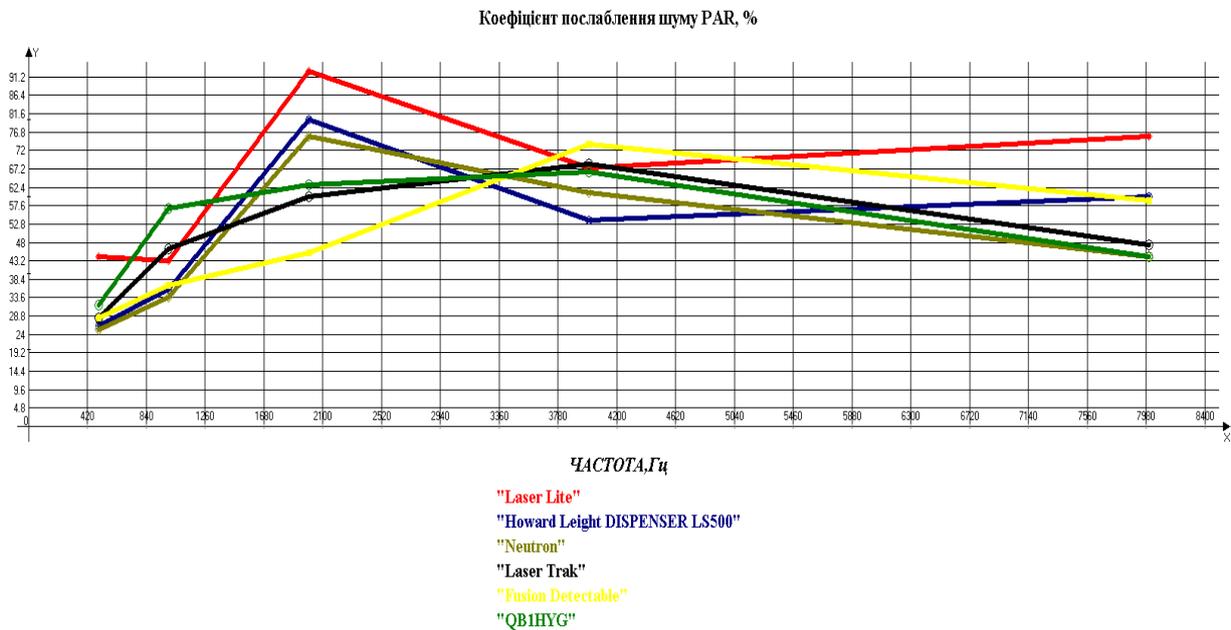


Рис. Ослаблення впливу шуму під час використання працівниками ПШЗС

Висновки

Представлений в статті аналіз даних, зібраних у великого числа будівельників, показав що при виконанні будівельних робіт одне лише застосування ПШЗС не дозволяє знизити вплив шуму до безпечного рівня. Зіставлення інформації про фактичне ослаблення шуму (при використанні ПШЗС робочими) з тією часткою часу, коли їх застосовують, показало що в середньому ПШЗС знижують середньозмінний еквівалентний рівень шуму менш ніж на 3 дБА; і що в ті періоди часу, коли вплив шуму перевищує ПДУ (при проведенні цього дослідження вважали 85 дБА)

застосування ПШЗС дозволяє знизити вплив до безпечного лише 20 % цього часу. Очевидно, що необхідно докласти додаткових зусиль для того, щоб ПШЗС були більш доступні для будівельників; щоб навчити робітників як, коли і де їх використовувати. Але навіть при проведенні (адекватного) навчання можуть використовувати ПШЗС не завжди, коли це необхідно. Навіть після проведення повноцінного навчання в рамках програми захисту слуху, 25 % будівельників продовжували повідомляти про незастосування ПШЗС. Ця інформація відповідає результатам досліджень,

проведених раніше Hong et al., які показали, що ставлення будівельників до застосування ПШЗС змінити нелегко. Результати і нашого дослідження, і тих, що проводилися раніше показують, що надійний захист

будівельника від шуму за допомогою ПШЗС неможлива, і що необхідні спільні зусилля для розробки простих і ефективних засобів колективного захисту від шуму при виконанні будівельних робіт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Celik T., Kamali S., Arayici Y. Social cost in construction projects. *Environ. Impact Assess.* 2017. Rev. 64. Pp. 77–86.
2. Hammad A. W. A., Akbarnezhad A., Rey D. A multi-objective mixed integer nonlinear programming model for construction site layout planning to mini-mise noise pollution and transport costs. *Autom. Constr.* 2016. № 61. Pp. 73–85.
3. Oliveira C. R. D., Arenas G. W. N. Occupational exposure to noise pollution in anesthesiology. *Rev. Bras. Anesthesiol.* 2012. № 62 (2). Pp. 253–261.
4. Kang S., Chae J. Harmony search for the layout design of an unequal area facility. *Expert Syst. Appl.* 2017. № 79. Pp. 269–281.
5. Baksh K., Ganpat W., Narine L. Farmers knowledge, attitudes and perceptions of occupational health and safety hazards in Trinidad, West Indies and implications for the agriculture sector. *Journal of Agricultural Extension and Rural Development.* 2015. Vol. 7, № 7. Pp. 221–228.
6. Demeke A. Assessment of the Utilization of Personal Protective Equipment Among Textile Industry Workers in Dukem Town. Addis Ababa University, Addis Ababa, Ethiopia, 2017.
7. Duguma F. K. Assessment of safety equipment utilization rate and magnitude of occupational related incidences among workers in the ministry of defense construction CMC site. *Civil Engineering Research Journal.* 2018. Vol. 9, № 2. Addis Ababa, Ethiopia.
8. Беспалова А. В., Книш О. І., Дашковська О. П., Файзуліна О. А. Комплексометрична модель реконструкції портової зони із використанням акустичних показників експлуатації будівельного обладнання. *Вісник одеського національного морського університету.* 2018. № 4 (57). С. 178–187.

REFERENCES

1. Celik T., Kamali S. and Arayici Y. Social cost in construction projects. *Environ. Impact Assess.* 2017, rev. 64, pp. 77–86.
2. Hammad A.W.A., Akbarnezhad A. and Rey D. A multi-objective mixed integer nonlinear programming model for construction site layout planning to mini-mise noise pollution and transport costs. *Autom. Constr.* 2016, no. 61, pp. 73–85.
3. Oliveira C.R.D. and Arenas G.W.N. Occupational exposure to noise pollution in anesthesiology. *Rev. Bras. Anesthesiol.* 2012, no. 62 (2), pp. 253–261.
4. Kang S. and Chae J. Harmony search for the layout design of an unequal area facility. *Expert Syst. Appl.* 2017, no. 79, pp. 269–281.
5. Baksh K., Ganpat W. and Narine L. Farmers knowledge, attitudes and perceptions of occupational health and safety hazards in Trinidad, West Indies and implications for the agriculture sector. *Journal of Agricultural Extension and Rural Development.* 2015, vol. 7, no. 7, pp. 221–228.
6. Demeke A. Assessment of the Utilization of Personal Protective Equipment Among Textile Industry Workers in Dukem Town. Addis Ababa University, Addis Ababa, Ethiopia, 2017.
7. Duguma F.K. Assessment of safety equipment utilization rate and magnitude of occupational related incidences among workers in the ministry of defense construction CMC site. *Civil Engineering Research Journal.* 2018, vol. 9, no. 2, Addis Ababa, Ethiopia.
8. Bepalova A.V., Knysh O.I., Dashkovska O.P. and Faizulyna O.A. *Kompleksometrychna model rekonstruktsii portovoi zony iz vykorystanniam akustychnykh pokaznykiv ekspluatatsii budivelnoho obladdannia* [Complexometric model of port area reconstruction using acoustic indicators of construction equipment operation]. *Visnyk Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu* [Bulletin of Odessa National Maritime University]. 2018, no. 4 (57), pp. 178–187. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 27.09.2025.

УДК 658.382:613.64:621.8.035

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.241225.26.1206

МЕТОДОЛОГІЯ МОНІТОРИНГУ І ОЦІНКИ УМОВ ПРАЦІ НА ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВАХ В УМОВАХ ТЕПЛОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА РОБОЧИХ МІСЦЯХ

БЕЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,

СТРЕЖЕКУРОВ Ю. Е.^{2*}, *асп.*,

КЛИМЕНКО Г. О.³, *канд. техн. наук, доц.*,

ТОДОРОВ О. П.⁴, *асп.*

¹ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 097-51-59, e-mail: staty_mail.ua@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-1791-395X

³ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (096) 763-76-17, e-mail: klimenko.anna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6885-3144

⁴ Кафедра охорони праці, цивільної та техногенної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 523-22-55, e-mail: 5232255@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-2274-0560

Анотація. Постановка проблеми. На петургійних, метаталурнійних та склоплавних виробництвах де використовуються високотемпературні технологічні процеси існує проблема перегріву працівників через значне теплове навантаження. Тому виникає необхідність описати методологію проведення дослідження підприємств, включаючи визначення цілей та завдань, вибі методів збору та аналізу даних та оцінку отриманих результатів; систематичного підходу та використанні наукових методів для забезпечення достовірності дослідження. В рамках статті розглядаються різні типи шкідливих та небезпечних факторів, такі як фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні, з особливим акцентом на їх вплив на здоров'я працівників і на загальну безпеку на робочому місці. **Мета статті** – надати початківцям-науковцям з області безпеки та гігієни праці необхідні знання та керівництво щодо проведення досліджень шкідливих та небезпечних факторів на підприємствах. Враховуючи складність теми та різноманітність факторів, які можуть впливати на робочі місця, розглядаються основні кроки, які слід дотримуватися для успішного виконання дослідження. Що допоможе молодим науковцям зрозуміти, з чого починати та які етапи потрібно пройти для отримання цінних результатів та розробки рекомендацій з покращення умов праці на підприємствах. Екстрапольоване та стисле але в водночас детальні інструкції з основних принципів до підходів у дослідженні виробничих підприємств і робочого простору, що використовуються для дослідницьких та наукових праць. Представлена інформація надає практичні рекомендації та інструменти для проведення досліджень шкідливих та небезпечних факторів на підприємствах. Це дозволяє спеціалістам у галузі охорони праці та безпеки, а також керівникам підприємств, створити безпечне та здорове робоче середовище для своїх працівників. **Висновок.** Розрахована комплексна методологія моніторингу та аналізу умов праці на промислових підприємствах в умовах теплового навантаження на робочих місцях. Розроблено покрокове керівництво для дослідників, що дозволяє ефективно виявляти, оцінювати та усувати потенційні ризики для здоров'я працівників. Наведено конкретні рекомендації щодо проведення аналізу, інтерпретації даних, визначення пріоритетів і плану дій. Систематичний підхід сприятиме підвищенню рівня безпеки та умов праці на промислових підприємствах, а також покращенню якості життя робітників.

Ключові слова: умови праці; дослідження; шкідливі та небезпечні фактори підприємства; аналіз даних; безпека на робочому місці; систематичний підхід; наукові методи

METHODOLOGY FOR MONITORING AND ANALYSIS OF WORKING CONDITIONS AT INDUSTRIAL ENTERPRISES UNDER THERMAL LOAD ON WORKPLACES

BIELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

STREZHEKUROV Yu.E.^{3*}, *Postgrad. Stud.*,

KLYMENKO H.O.³, *Cand. Sc.(Tech.), Assoc. Prof.*,

TODOROV O.P.⁴, *Postgrad. Stud.*

¹ Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

^{2*} Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: staty.mail.ua@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-1791-395X

^{3*} Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (096) 763-76-17, e-mail: klimenko.anna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6885-3144

⁴ Department of Labor Protection, Civil and Technogenic Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 523-22-55, e-mail: 5232255@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-2274-0560

Abstract. Problem statement. At metallurgical, metal-working, and glass-making production facilities where high-temperature technological processes are utilized, there is a problem of worker overheating due to significant thermal load. Therefore, there is a need to describe the methodology for conducting research at enterprises, including defining goals and objectives, selecting data collection and analysis methods, and evaluating the obtained results; a systematic approach and the use of scientific methods to ensure the reliability of the research. The article examines various types of harmful and hazardous factors, such as physical, chemical, biological, and psychophysiological, with a particular emphasis on their impact on worker health and overall workplace safety. *The main objectives include* – To provide novice scientists in the field of occupational health and safety with the necessary knowledge and guidance on conducting research on hazardous and dangerous factors in enterprises. Considering the complexity of the subject and the variety of factors that can influence workplaces, the fundamental steps required for successful research execution are discussed. This will help young researchers understand where to begin and which stages to traverse to attain valuable results and develop recommendations for enhancing working conditions at enterprises. Extrapolated and concise yet simultaneously detailed instructions on the basic principles to approaches in researching industrial enterprises and workspaces, utilized for investigative and scientific endeavors, are provided. The presented information offers practical recommendations and tools for investigating harmful and dangerous factors in enterprises, enabling professionals in the field of labor protection and safety, as well as enterprise managers, to establish a safe and healthy work environment for their employees. **Conclusion.** The proposed comprehensive methodology for monitoring and analyzing working conditions at industrial enterprises under thermal load in workplaces. A step-by-step guide has been developed for researchers, enabling effective identification, assessment, and mitigation of potential health risks for employees. Specific recommendations are provided for conducting analysis, interpreting data, determining priorities, and action planning. A systematic approach will contribute to the improvement of safety levels and working conditions at industrial enterprises, as well as enhance the quality of life for workers.

Keywords: *working conditions; research; harmful and dangerous factors in enterprises; data analysis; workplace safety; systematic approach; scientific methods*

Постановка проблеми. Зважаючи на потреби початківців дослідників, ця стаття має на меті надати конкретне практичне керівництво до плану дій, щодо дослідження підприємств у галузі БЖД. Завдання відповісти на такі питання виконавця дослідження: Які основні кроки потрібно виконати перед початком дослідження у галузі БЖД? Які методи, підходи та технічні засоби слід застосовувати для збору та аналізу даних у дослідженні? Які критерії вибору методів дослідження та інструментів оцінки ризиків? Які кроки потрібно виконати для інтерпретації результатів дослідження та надання рекомендацій [3–5].

Аналіз публікацій. Проведений огляд літератури базується на аналізі актуальних публікацій, таких як навчальні підручники та посібники [1; 2]. На основі проведеного

аналізу виділено основні тематичні напрямки та ключові питання які актуальні при проведенні дослідження шкідливих та небезпечних факторів на підприємствах.

Аналіз методологічних підходів дозволяє зрозуміти, які методи та підходи використовуються для досліджень підприємств в Україні.

Мета дослідження – У сьогоденні молоді науковці стикаються з різноманітними викликами у сфері БЖД, такими як ризики робочого середовища, нові технології, хімічні та біологічні загрози, а також потреба відповідати на нормативні вимоги що змінюються [5–7]. Актуальність надати початківцям у науково-дослідній сфері необхідні практичні знання та інструменти для ефективного проведення досліджень на підприємствах. Тому початківцям-науковцям

з області безпеки та гігієни праці необхідні екстрапольовані знання та керівництво щодо проведення досліджень шкідливих та небезпечних факторів пов'язаних з тепловим випромінюванням на підприємствах, у простій для швидкості засвоєння і доступній формі викладення інформації.

Результати досліджень.

1. Основні кроки дослідження підприємства на наявність шкідливих та негативних факторів у галузі БЖД.

Опанування процесу дослідження підприємства на наявність шкідливих факторів у галузі безпеки, гігієни та довкілля праці є ретельною задачею. Однак, наведені нижче кроки допоможуть у цьому процесі:

1) Перед початком дослідження важливо ознайомитись з основними аспектами галузі, в якій працює підприємство. Це включає вивчення правових і нормативних вимог, стандартів безпеки та гігієни праці, основних ризиків, що властиві даній галузі [1].

Наприклад: «Підприємство ПромЕнергія спеціалізується з виробництва: комплексних феросплавів на основі феросиліцію ФС25 і ФС45 з модифікаторами. Що характеризується високою насиченістю технологічним обладнанням, що споживає значну кількість

енергії та створює запиленість, загазованість і надлишкове теплове випромінювання на робочих місцях» [6].

2) Розробка плану дослідження, що включає методи інвентаризації потенційних шкідливих факторів, збір проб, проведення вимірювань, аналіз даних та формулювання висновків.

3) Оцінка всіх можливих джерел шкідливих факторів у підприємстві. Це можуть бути хімічні речовини, фізичні фактори (шум, вібрація, радіація тощо), біологічні агенти (мікроорганізми, пилові частки), психосоціальні фактори (стрес, перевантаження роботи).

4) Збір інформації про підприємство, такої як його організаційна структура, процеси виробництва, використання матеріалів і речовин, робочі умови, діяльність з охорони праці та довкілля, будівельна технічна інвентаризація [2].

5) Створіть план підприємства з зазначенням на ньому області з ключовим обладнанням у дослідженні та загальним розташуванням робочих місць і обладнання їх технічні характеристики. Вкажіть усі відстані між обладнанням та робочими місцями. Приклад зображено на рисунку 1 та 2.

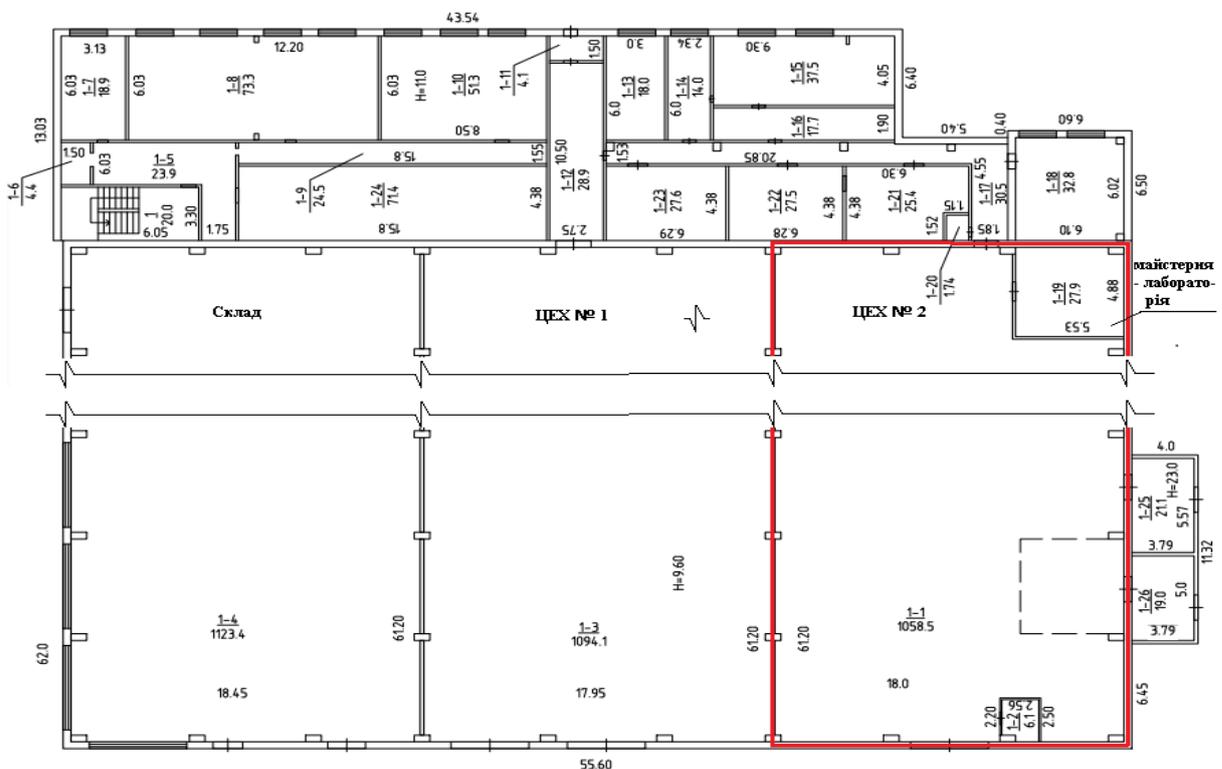


Рис. 1. Загальний план підприємства ТОВ «ПромЕнергія», м. Кам'янське



Рис. 2. План розташування робочих місць та технологічного, високотемпературного впливу обладнання у цеху: основна піч – РКО2-ПВ рудова кругла відкрита 3-х електродна, електродугова, $W = 2 \text{ МВт}$; $I = 12 \text{ кА}$; $U = 45\text{--}90 \text{ В}$ постійного струму; лабораторна піч рудова кругла відкритого типу 1-но електродна електродугова, $W = 150 \text{ кВт}$; $I = 1,7 \text{ кА}$; $U = 45\text{--}90 \text{ В}$ змінного струму; компресорні установки – 2 шт. $V = 1600 \text{ л/год.}$; $W = 7,5 \text{ кВт}$; Брикетувальний прес ПШ-350 – 15 кВт ; зварювальний пост $W = 12 \text{ кВт}$; Кран № 2 – 10 т

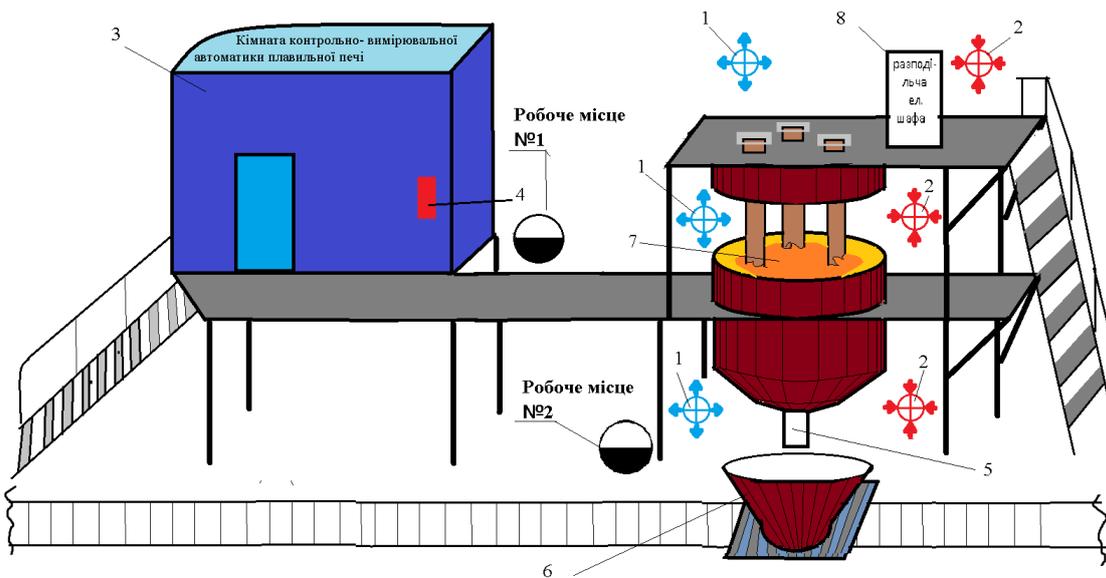


Рис. 3. Вплив високих температур на робоче місце операторів плавильної печі (джерело № 1 та № 2): 1 – вентиляція притоку повітря; 2 – витяжна вентиляція; 3 – кімната контрольно-вимірювальної автоматики керування плавильної печі; 4 – аварійний пульт керування; 5 – жолоб зливу виплавленого сплаву; 6 – рухомий бункер для зливу сплаву – джерело випромінювання № 2; 7 – горизонтальна плавильна піч діаметром 3 м з розплавом – джерело випромінювання № 1; 8 – розподільча шафа дугових електродів; робоче місце № 1; робоче місце № 2

6) На багатьох підприємствах з використанням високотемпературних процесів часто обладнання та конструкції цеху вкриті пилом, що не дозволяє зробити чіткі та світлі фотографії загального виду конструкції. Тому має сенс створення ескізу досліджуємого обладнання з прив'язкою робочих місць та підписаними кожним елементом. Приклад зображено на рисунку 3.

7) Здійснення збір проб параметрів відповідаючи за умови мікроклімату (таких як рівень шуму, освітленість, концентрація хімічних речовин тощо) та особливо величини що є основою майбутнього дослідження [7].

8) Обробіть отримані дані і проведіть їх аналіз, використовуючи наукові методи і стандарти. Порівняйте результати з встановленими нормами та рекомендаціями.

9) Сформулюйте висновки на основі аналізу даних. Визначте, чи існують шкідливі та небезпечні фактори.

2. Методи та підходи які застосовуються для збору та аналізу даних у дослідженні.

У дослідженні підприємства можна використовувати різні методи та підходи для збору та аналізу даних. Які включають наступне:

1) Документальний аналіз оцінки доступних документів схожих підприємств, таких як звіти про безпеку, стандарти, політики та процедури та інші фактори, які мають вплив на безпеку та гігієну. Що надає цінну інформацію про підприємство.

2) Пряме спостереження робочого середовища та процесів виробництва (робочі умови, використання обладнання та речовин, дотримання правил безпеки та гігієни) дає уявлення про потенційні шкідливі фактори.

3) Інтерв'ю зі співробітниками підприємства, включаючи керівників та робітників, може надати додаткову інформацію про умови праці, ризики та заходи безпеки. Інтерв'ю можна проводити у форматі структурованих або вільних співбесід.

4) Анкетування допомагає зібрати систематичну інформацію від співробітників підприємства. Анкети можуть містити питання щодо умов праці, використання речовин, навичок та знань співробітників щодо безпеки та гігієни.

5) Збір даних шляхом вимірювань за допомогою вимірювальних пристроїв необхідний для оцінки фізичних параметрів, таких як рівень шуму, освітленість, концентрація хімічних речовин та інших факторів, які можуть впливати на безпеку та гігієну праці. Зі складанням та записом у структуровані таблиці [8; 9].

6) Аналіз статистичних даних допомагає виявити залежності та тенденції у даних. Це може включати аналіз трендів за часом, порівняння груп даних та виявлення статистично значущих залежностей.

7) Консультація з експертами з області безпеки, гігієни праці надає оцінку похибок при висновках. Експерти можуть бути залучені для оцінки ризиків, визначення відповідності стандартам та розробки стратегій безпеки.

8) Важливо також враховувати етичні аспекти збору та аналізу даних, забезпечуючи конфіденційність та анонімність інформації, дотримуючись правил та норм, що стосуються дослідження та захисту персональних даних.

Розглянемо на прикладі розробки паперових анкет:

8.1) Для забезпечення анонімності респондентів анкет, застосовують систему кодування:

- перша частина коду ДДММРРРР (дата, місяць, рік);
- друга частина коду «Перша літера» імені матері;
- третя частина коду РРРР (рік народження респондента).

8.2) Титульна сторінка – чітко вказати назву дослідження, мету, заклад, який проводить, та контактну інформацію.

8.3) Інструкція – надати зрозумілі вказівки щодо заповнення анкети, наголосити на конфіденційності даних.

8.4) Нумерація питань – пронумерувати всі запитання для зручності заповнення та подальшого аналізу.

8.5) Варіанти відповідей – сформулювати чіткі, вичерпні варіанти відповідей для закритих питань.

8.6) Вільні поля – передбачити місце для власних записів респондентів при необхідності.

8.7) Подяка – в кінці висловити подяку за участь у дослідженні.

8.8) Ідентифікація – за потреби включити поле для зазначення імені/коду респондента [1; 2].

Ці методи та підходи можуть бути комбіновані та адаптовані відповідно до конкретних потреб дослідження певного підприємства.

3. Критерії вибору методів дослідження та інструментів оцінки ризиків.

При виборі методик дослідження та інструментів оцінки ризиків для дослідження підприємства, важливо враховувати декілька критеріїв:

1) Визначте, яку саме інформацію ви хочете отримати в результаті дослідження. Чи хочете ви оцінити загальний рівень ризиків, ідентифікувати конкретні небезпеки або виявити недоліки у системі безпеки?

2) Оцініть доступність даних, необхідних для проведення дослідження. Якщо ви маєте обмежений доступ до внутрішніх документів або доступу до підприємства, можливо, деякі методи дослідження будуть недоступні. В такому випадку оберіть методи, які базуються на зовнішніх джерелах інформації або можуть бути виконані на основі розрахунків емпіричними методами [4].

Доцільно взяти данні з аналогічного підприємства за схожими параметрами, або скористатись розрахунком за допомогою штучного інтелекту запрограмувавши його особистість та надавши чітке завдання що робити та на які данні опиратись. Приклад застосування розрахунків за допомогою штучного інтелекту в умовах неможливості прямих вимірів параметрів високотемпературного джерела приведено на рисунку 4 та таблиці 1.

Таблиця 1

Зміна площі випромінювання, що впливає на робітника під час виконання робіт на робочому місці біля плавильної печі

L, [м] Відстань до робітника	$\angle\theta_2$, [град°] Кут ближнього краю	$\angle\theta_1$, [град°] Кут дальнього краю	S, [м²] Видима площа опромінювання
0,5	53	23	4,71
1	48	19	4,44
1,5	42	16	4,18
2	39	12	3,71
3	25	7	3,27
5	12	5	2,48

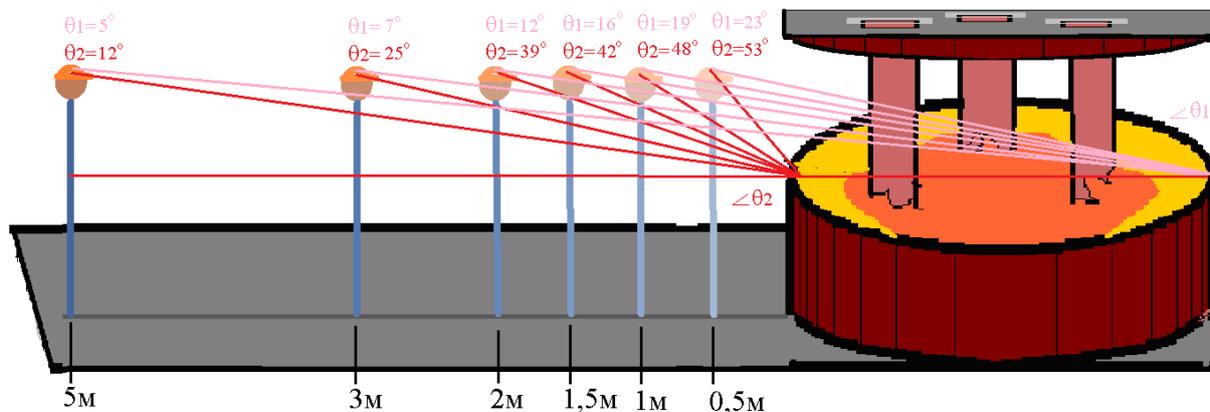


Рис. 4. Зміна тілесного кута опромінювання при віддаленні від джерела випромінювання діаметром 3 м

3) Врахуйте ресурси, які ви готові витратити на дослідження. Деякі методи дослідження можуть вимагати значних зусиль, витрат часу та коштів. Виберіть методи, які відповідають вашим ресурсам та можуть бути ефективно виконані в рамках обмежень.

4) Переконайтеся, що обрані методи та інструменти є об'єктивними та надійними. Вони повинні забезпечувати точність та правдивість результатів дослідження.

5) Переконайтеся, що обрані методи та інструменти відповідають законодавчим

вимогам щодо дослідження безпеки та оцінки ризиків. Врахуйте національні та міжнародні нормативні акти, стандарти та рекомендації, які регулюють проведення таких досліджень.

4. Кроки які потрібно виконати для інтерпретації результатів дослідження та формулювання рекомендацій.

Для інтерпретації результатів дослідження та формулювання рекомендацій щодо шкідливих та небезпечних факторів на підприємстві та робочому місці, виконуються наступні кроки [8; 9]:

1) Ретельно проаналізуйте всі зібрані дані, включаючи результати аудиту безпеки, анкетування працівників, огляд літератури, експертну оцінку та інші джерела інформації. Визначте найбільш шкідливі та небезпечні фактори, які виявлені на підприємстві та робочому місці.

2) Виконайте оцінку ризику для факторів що перевищують гранично допустимі норми. Врахуйте імовірність виникнення негативних наслідків та потенційну серйозність цих наслідків для здоров'я та безпеки працівників. Використовуйте відповідні методики оцінки ризику, такі як матриця ризиків або методика оцінки за допомогою числових значень.

3) Враховуючи результати оцінки ризику, визначте фактори, які є найбільш небезпечними та потребують негайної уваги та втручання.

4) На підставі виявлених факторів ризику та їх пріоритетів, розробіть конкретні рекомендації для усунення шкідливих та небезпечних факторів. Рекомендації повинні бути конкретними, практичними та реалістичними для впровадження на підприємстві. Вони можуть включати зміни в процесах роботи, політиках безпеки, навчанні працівників, обладнанні та інших аспектах безпеки та охорони праці.

5) Розробіть план дій для впровадження рекомендацій, конкретні кроки, терміни виконання та відповідальних осіб. Забезпечте, щоб план дій був реалістичним та мав чітко визначені критерії успішності.

6) Реалізуйте запропоновані рекомендації та виконуйте заплановані кроки. Постійно моніторить їх впровадження та ефективність. Забезпечуйте взаємодію з стейкхолдерами та залучайте їх підтримку у виконанні плану дій.

7) Періодично оцінюйте результати впровадження рекомендацій. Порівнюйте їх зі

зазначеними критеріями успішності та визначайте, наскільки ефективно було ліквідовано проблеми шкідливих та небезпечних факторів. Вносьте корективи до плану дій, якщо необхідно.

8) Звітність: Після завершення дослідження та впровадження рекомендацій підготуйте звіт, який містить важливі результати дослідження, аналіз ризиків, рекомендації та досягнуті результати. Забезпечте, щоб звіт був доступним для всіх зацікавлених сторін [7].

Виконання цих кроків допоможе зменшенню шкідливих та небезпечних факторів на підприємстві та робочому місці.

Висновки

1. Розглянуто питання дослідження шкідливих та небезпечних факторів на підприємстві та на робочому місці. З метою розробки керівництво до дії для дослідників, які планують проводити аналіз підприємств.

2. Визначено кроки, необхідні для ефективного виконання дослідження. Аналіз отриманих даних, оцінка ризику, визначення пріоритетів, розробка рекомендацій, план дій, виконання та моніторинг, оцінка результатів та звітність є основними етапами процесу дослідження.

3. Рекомендації, розроблені на основі результатів дослідження, є конкретними та практичними заходами для дослідження і покращення умов праці.

4. Систематичний та комплексний підхід до дослідження, сприяє молодим дослідникам мати можливість ефективно виконувати дослідження на нових підприємствах, ідентифікувати шкідливі та небезпечні фактори, визначати ризики та розробляти рекомендації для їх усунення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Романчиков В. І. Основи наукових досліджень. Київ : Центр учбової літератури, 2007. 255 с.
2. Ковальчук В. В., Моїсєєв Л. М. Основи наукових досліджень. Київ : ВД «Професіонал», 2005. 240 с.
3. Шаленний В. Т., Шаломов В. А., Папірник Р. Б. Напрямки удосконалення сучасних технологій, матеріалів і обладнання із врахуванням енергетичних витрат та умов праці будівельних робітників. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение*. 2010. Вип. 52. С. 127–131.
4. Беліков А. С., Шаломов В. А., Рагімов С. Ю., Михайлов М. О. Фізичне моделювання зміни енергетичного впливу на робочі місця з урахуванням високотемпературного випромінювання. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2017. Вип. 4. С. 10–17.
5. Стрежекуров Ю. Е. Аналіз впливу негативних та шкідливих факторів на виникнення професійних захворювань. *Безпека життєдіяльності в XXI столітті*. 2024.
6. Беліков А. С., Стрежекуров Ю. Е., Рагімов С. Ю., Харченко В. В. До питання комплексного оцінки впливу теплового випромінювання на робочих місцях з урахуванням забруднення повітряного середовища. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. Вип. 1. С. 26–32.

7. Беліков А. С., Шаломов В. А., Рагімов С. Ю., Михайлов М. О. Фізичне моделювання зміни енергетичного впливу на робочі місця з урахуванням високотемпературного випромінювання. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2017. Вип. 4. С. 10–17.
8. Беліков А. С., Соколов І. А., Стрежекуров Ю. Е. Експрес-метод визначення теплозахистної здатності будівельних конструкцій. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. Вип. 6. С. 84–91.
9. Беліков А. С., Стрежекуров Ю. Е. Удосконалення приладу оцінки терморадіаційної напруженості на робочих місцях. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2025. Вип. 1. С. 40–46.

REFERENCES

1. Romanchikov V.I. *Osnovi naukovih doslidzhen* [Basics of scientific research]. Kyiv : Educational Literature Center, 2007, 255 p. (in Ukrainian).
2. Kovalchuk V.V. and Moiseev L.M. *Osnovi naukovih doslidzhen* [Basics of scientific research]. Kyiv : Publishing House “Professional”, 2005, 240 p. (in Ukrainian).
3. Shalennuy V.T., Shalomov V.A. and Papirnyuk R.B. *Napriamki udoskonalennia suchasnykh tekhnologiy, materialiv i obladannia iz vrakhuvanniam energetychnykh vutrat ta umov pratsi budivel'nykh robnukiv* [Directions for improving modern technologies, materials and equipment, taking into account energy costs and working conditions of construction workers]. *Stroitelstvo. Materialovedenie. Mashinostroenie* [Construction Materials Science. Mechanical Engineering]. 2010, no. 52, pp. 127–131. (in Ukrainian).
4. Bielikov A.S., Shalomov V.A., Ragimov S.Yu. and Mukhaylov M.O. *Fizychne modeliuвання zminu energetychnogo vplivu na robochi mista z urakhuvanniam vysokotemperaturnogo vyprominiuvannya* [Physical modeling of changes in energy impact on workplaces taking into account high-temperature radiation]. *Visnyk Prydniprovsk'oi derzhpavoi akademii budivnytstva ta arkhitekturn* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineerinf and Architecture]. 2017, no. 4, pp. 10–17. (in Ukrainian).
5. Strezhekurov Yu.E. *Analiz vplivu negativnih ta shkidlivih faktoriv na viniknennya profesiynih zahvoryuvan* [Analysis of the influence of negative and harmful factors on the emergence of occupational diseases]. *Bezpeka zhitediyalnosti v XXI stoliti* [Life Safety in the XXI Century]. 2024. (in Ukrainian).
6. Bielikov A.S., Strezhekurov Yu.E., Ragimov S.Yu. and Kharchenko V.V. *Do pitanya kompleksnogo ocinki vplivu teplovogo viprominyuvannya na robochih misyach z urahuvanyam zabrudnennya povitryanogo seredovisha* [To the question of the complex assessment of the impact of heat radiation at workplaces taking into account air pollution]. *Visnyk Prydniprovsk'oi derzhpavoi akademii budivnytstva ta arkhitekturn* [Ukrainian Journal of Construction and Architecture]. 2024, no. 1, pp. 26–32. (in Ukrainian).
7. Bielikov A.S., Shalomov V.A., Ragimov S.Yu. and Mukhaylov M.O. *Fizychne modeliuвання zminu energetychnogo vplivu na robochi mista z urakhuvanniam vysokotemperaturnogo vyprominiuvannya* [Physical modeling of changes in energy impact on workplaces taking into account high-temperature radiation]. *Visnyk Prydniprovsk'oi derzhpavoi akademii budivnytstva ta arkhitekturn* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineerinf and Architecture]. 2017, no. 4, pp. 10–17. (in Ukrainian).
8. Bielikov A.S. and Strezhekurov Yu.E. *Exspres-metod viznachennya teplozahistnih zdatnosti budivelnih konstrukcii* [Express method for determining the thermal insulation capacity of building structures]. *Visnyk Prydniprovsk'oi derzhpavoi akademii budivnytstva ta arkhitekturn* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineerinf and Architecture]. 2024, no. 6, pp. 84–91. (in Ukrainian).
9. Bielikov A.S. and Strezhekurov Yu.E. *Udoskonalennya priladu ocinki termoradiaciynoi napruzhenosti na robochih misyach* [Improvement of the device for assessing thermal radiation stress in workplaces]. *Visnyk Prydniprovsk'oi derzhpavoi akademii budivnytstva ta arkhitekturn* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineerinf and Architecture]. 2025, no. 1, pp. 40–46. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 12.10.2025.

УДК 37.013.42

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.241225.34.1207

ФІЛОСОФСЬКІ ПРОБЛЕМИ ОСВІТИ : УКРАЇНСЬКИЙ АСПЕКТ

БІЛОПОЛІЙ В. В.^{1*}, канд. іст. наук, доц.,

ГРЕБІННИК Т. О.², канд. іст. наук, доц.

^{1*}Кафедра філософії, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-11, e-mail: bv11.5@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-9935-7568

² Кафедра філософії, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-11, e-mail: grebinnyk.tetyana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-1722-9242

Анотація. Постановка проблеми. У зв'язку з реформуванням вищих навчальних закладів в Україні недостатньо дослідних матеріалів, що можуть допомогти системно та послідовно вирішувати проблему зміни вищої освіти в цілому. **Мета статті.** Дослідити як зміни у суспільстві вплинули на відношення сучасної молоді до необхідності отримання вищої освіти і дослідити такий процес як «масовізація» вищої освіти. **Виклад матеріалу.** Процес отримання знань, в силу відомих обставин, значно ускладнився, порушилися традиційні форми, і, відповідно, якісні показники. Про сучасність та актуальність теми освіти і вищої зокрема, свідчить активність її обговорення в літературі. Освіта в Україні стикається з дуже багатьма викликами і перед суспільством постає питання, в якому напрямку потрібно рухатись вищій школі. Сьогодні, як ніколи, освіта в Україні потребує ґрунтовного, філософського осмислення. В статті аналізується філософське питання про необхідність вищої освіти взагалі, спираючись як на наукові дослідження, так і на соціологічні дані, які були отримані в грудні 2024 року серед молоді України. Оскільки тема дуже багатогранна, автори зупинились на одному з аспектів підготовки фахівців вищої ланки, це різке збільшення кількості студентів (здобувачів вищої освіти). Констатуючи факти стану сучасної вищої освіти, можна сказати, що вона все більше набуває масового характеру. З цього приводу з'явився новий термін «масовізація» освіти; навіть війна не порушує відсоток молоді, яка вступає до вишу. **Висновок.** На сучасному етапі вища освіта в Україні має адаптуватися в бік якості, модерності, де вона програє закордонним вишам. У розгорнутому світі можливостей, «вища освіта» залишається важливою, але не є єдиним шляхом до успіху і слід пам'ятати, що вища освіта це той перший крок, який допоможе молодій людині визначити своє місце в суспільстві.

Ключові слова: філософія освіти; задачі вищої освіти; масовізація; альтернатива вищої освіти

PHILOSOPHICAL PROBLEMS OF EDUCATION:UKRAINIAN ASPECT

BILOPOLIY V.V.^{1*}, *Cand. Sc. (History), Assoc. Prof.*,

HREBINNYK T.O.², *Cand. Sc. (History), Assoc. Prof.*

^{1*} Department of Philosophy, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-16-11, e-mail: bv11.5@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-9935-7568

² Department of Philosophy, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-16-11, e-mail: grebinnyk.tetyana@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-1722-9242

Abstract. Statement of the problem. Due to the reform of higher education institutions in Ukraine, there is not enough research materials that can help systematically and consistently solve the problem of the formation of higher education. **The purpose of the article.** To study how changes in society have influenced the attitude of modern youth to the need to obtain higher education and to investigate such a process as the “massification” of higher education. **Presentation of the material.** The process of obtaining knowledge, due to certain circumstances, has become significantly more complicated, traditional forms have been disrupted, and, accordingly, qualitative indicators. The modernity and relevance of the topic of education, and higher education in particular, is evidenced by the activity of its discussion in the literature. Education in Ukraine faces many challenges and society is faced with the question of which direction higher education should move. Today, more than ever, education in Ukraine requires a thorough, philosophical reflection. The article analyzes the philosophical question of the need for higher education in general, based on both scientific research and sociological data obtained in December 2024 among the youth of Ukraine. Since

the topic is very multifaceted, the authors focused on one aspect of the training of higher education specialists, which is a sharp increase in the number of students (higher education applicants). Stating the facts of the state of modern higher education, we can say that it is increasingly becoming mass. In this regard, a new term “massification” of education has appeared; Even war does not affect the percentage of young people entering higher education. **Conclusion.** At the present stage, higher education in Ukraine must adapt towards quality, modernity, where it loses to foreign universities. In the vast world of opportunities, “higher education” remains important, but is not the only path to success and it should be remembered that higher education is the first step that will help a young person determine his place in society.

Keywords: *philosophy of education; tasks of higher education; massification; alternative to higher education*

Вступ. В останнє десятиліття українське суспільство на власному досвіді переконалося, як нестабільність політичної системи може впливати на соціально-економічну і духовну сфери життя і, навпаки, як підвищена соціальна напруженість здатна повністю паралізувати нормальний розвиток держави. Саме освіта повинна стати основою всебічного розвитку особистості, її успішного залучення до суспільства, економічного благополуччя, запорукою розвитку країни, об'єднаного спільними пріоритетами, культурою, та держави. Але освіта в Україні стикається з дуже багатьма викликами і перед суспільством постає питання, в якому напрямку потрібно рухатись вищій школі. Сьогодні, як ніколи, освіта в Україні потребує ґрунтового, філософського осмислення.

Мета статті: дослідити як зміни у суспільстві вплинули на відношення сучасної молоді до необхідності отримання вищої освіти і дослідити такий процес як «масовізація» вищої освіти.

Виклад матеріалу. Проблеми останніх років, показали вразливість освіти в контексті формування життєвого простору майбутнього суспільства в цілому, яке пов'язане з втіленням результатів навчання в життя та впливом на життя людей. Процес отримання знань, в силу відомих обставин, значно ускладнився, порушилися традиційні форми, і, відповідно, якісні показники. Дистанційна освіта стала безповоротною реальністю і має багато позитивів, але і велику кількість недоліків. Це стосується, як середньої, так і вищої школи.

Зупинимося на одному з аспектів підготовки фахівців вищої ланки, та які варіанти пропонує на це сучасний світ.

Мета вищої освіти, в ракурсі

поставленої проблеми, бачиться в у вирішенні багатьох задач, які мають вплив на здобувача, соціум та розвиток держави. Тому цілями вищої освіти є перш за все, підготовка фахівців у вибраній галузі: вищі навчальні заклади готують студентів до виконання конкретних, суспільних, професійних ролей і завдань. Вища освіта дає здобувачам знання, навички і компетенції, які необхідні для подолання проблем у вибраних сферах діяльності. Але вона навчає студентів підходити до цих проблем творчо, з різних точок зору, обґрунтовувати свої погляди і приймати зважені рішення. З іншого боку є більш ґрунтовні завдання: потрібно підготувати фахівця, який зможе самостійно мислити і адекватно сприймати інформацію, тобто вища освіта повинна сприяти розвитку критичного мислення і аналітичних навичок. Невід'ємною частиною освіти є розширення загального культурного розвитку майбутнього громадянина, який сприяє підвищенню конкурентоздатності фахівця на ринку праці. Гуманітарні науки не є зайвими, їх роль важлива, тому що вони формують світогляд людини, його життєві принципи і поведінку.

Ціллю освіти є всебічний розвиток людини як особистості та найвищої цінності суспільства, її кращих інтелектуальних, творчих, фізичних здібностей, формування чеснот, необхідних для успішної самореалізації, – так каже нам Закон України «Про освіту», а чи справді саме вища освіта тут буде відігравати головну роль, а чи доцільна вища освіта взагалі. [1]

Це, так би мовити, в ідеалі, але сучасність, як завжди, вносить корективи, які пов'язані з якістю освіти, вмотивованістю її, та її альтернативи. Саме альтернативи вищій освіті, є гарним

подразником традиційної системи на шляху до професійної діяльності.

В кінці 2024 року українська платформа з розвитку кар'єри Happy Monday провела анонімне опитування про необхідність вищої освіти серед молоді України. [2]

Перше питання стосувалося необхідності вищої освіти в житті молодих українців. Надихас, що більшість (52,7 %) опитаних кажуть, що їм не вистачає вищої освіти, але 47,3 % молоді не бачать в цьому проблеми, більш того, з тих, хто хотів отримати вищу освіту 40,5 % потребували саме дипломи для роботодавців і тільки 12,2 % відчували необхідність в отриманні знань.

Це дуже тривожна тенденція як для розвитку нашого молодого покоління, так і для системи вищої освіти в державі. Стосовно цього питання ще є один цікавий показник: 62,2 % опитаних планують пов'язати своє життя з вищою освітою, а 31,1 % не бачать в цьому необхідності, а 6,8 % не мають можливості. Цікаві додаткові відповіді про переваги вищої освіти в відкритих питаннях, які сформулювали самі респонденти: «Вища освіта змінює мислення, вчить структурувати роботу, формує навички пошуку необхідної інформації, рішень», а ще – «навчає вчитися, домовлятися, керувати своїм часом, працювати з великими обсягами інформації, дисциплінує, розвиває стресостійкість, надає якісно краще й більш інтелектуальне середовище спілкування тощо». [2]

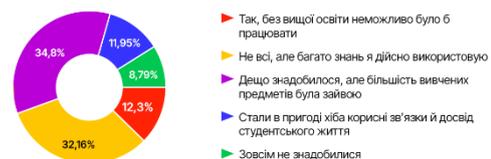
Тобто є надія, що молодь, яка стане студентами зможе переконатися в необхідності знань і тут вже необхідно робити висновки ВНЗ і переконливо показати, як знання можуть змінити життя. Ще не треба оставляти без уваги той маленькій відсоток бажаючих вчитися (можливо серед них є дуже талановиті люди), які дуже часто просто потребують фінансової підтримки. Для цього потрібно розвивати систему грантів, яка вже дуже поширена в інших країнах. Такий досвід потрібно не тільки вивчати, але і втілювати в життя.

Знання стали доступними. Нікого вже не здивуєш наявністю тижневих курсів журналіста, підприємця, тренера або програміста, після закінчення яких людина отримує свій пропуск до успішної кар'єри. Та й для тих, хто не бажає навіть закінчувати курсів, у сучасному світі також не бракує можливостей заробітку: блогерство, малий бізнес, модельна та кіноіндустрія широко відкривають свої двері для амбітної та цілеспрямованої молоді.[3]

Технологічні зміни, економічні трансформації, поява різноманітних шляхів досягнення успіху та розвитку в кар'єрі й вимоги сучасного ринку праці ставлять під сумнів традиційні уявлення про беззаперечну необхідність навчання в класичному університеті.

Другий блок питань вищезгаданого соціологічного дослідження був пов'язаний з співпадінням отриманої спеціальності і практичної роботи. Лише 27,3 % опитуваних працювали за фахом, але більшість (55 %) вважала, що навчання в ВНЗ не було марним. Результати відповідей на питання: «Знадобились знання чи ні у роботі?» – можна побачити на графічному колі (див. мал.).

Чи здобуті у виші знання знадобилися вам у роботі?



HappyMonday

Рис. НАЗВА?

Про проблеми сучасної вищої освіти сьогодні говорять багато, але треба звернути увагу на ті недоліки, які не влаштовують наших студентів і працювати над їх виправленням. Перш за все це: «застарілі методики викладання (75 %), відсутність достатньої кількості практики (74 %) та неактуальність інформації, що викладається (61,3 %)», і лише 1,4 % вважають що все добре [2]. У відкритому питанні найцікавішими були такі відповіді: «мало інтерактивності/мотиваційності, що впливає

на вивчення/освоєння матеріалу; багато бюрократії, погано продумані програми, застарілі й занадто формальні форми контролю; недостатнє фінансування; наявність обов'язкових предметів і відсутність предметів на вибір; мало сучасних спеціальностей, труднощі в поєднанні навчання з роботою тощо» [2].

Відповіді студентів свідчать, що вони зацікавлені в якісних знаннях і потрібно уважно прислухатись до їх думки та змінювати підходи як до викладання, так і до організації процесу навчання.

Тобто сучасні умови вимагають більш гнучкого ставлення до освіти, пов'язано це з тим, що, наприклад, раніше інформація ставала „старою” років через десять, потім ця цифра зменшилась до п'яти, а сьогодні, як показує практика, кожні два роки наші знання потребують оновлення [4].

Сучасний ринок праці переосмислює мотивацію щодо вищої освіти. Тому і вищим навчальним закладам, зберігаючи академічний підхід до оволодіння знаннями, потрібно йти назустріч сучасним вимогам суспільства. Наприклад, як відомо, провідні вищі навчальні заклади мають партнерства з профільними підприємствами, і це є передовим досвідом входу у професію і більше мотивуватиме молодь не відноситися скептично в отримання диплому ВНЗ.

Науковий прогрес набрав таких темпів, що знання, а відповідно і технології змінюються та стають не актуальними дуже швидко. Тому кожен фахівець, має займатися безперервною освітою, незалежно від професії, віку або стажу.

Як стверджують фахівці, що якщо кандидат на робоче місце не має диплому про вищу освіту, але, в той же час, володіє сучасними знаннями й готовий їх постійно оновлювати, він буде нічим не гірший, а може навіть й кращим за кандидата, що має лише фахову освіту, яка побудована на застарілому досвіді, також кандидат цікавий реальним досвідом, здатністю адаптуватися, та мати бажання працювати та швидко сприймати нове в постійній динаміці змін.

Але це тільки одна сторона медалі. Здавалось би, все зрозуміло, вища освіта

немов би, панацея від усіх негараздів.

Констатуючі факти стану сучасної вищої освіти, можна сказати, що вона все більше набуває масового характеру, навіть війна не порушує відсоток молоді, яка вступає до вишу.

Навіть з'явився новий термін «масовізація», хоча його визначення має різний характер для України і інших держав. Але в цілому це різке збільшення кількості студентів (здобувачів вищої освіти).

Про «масовізацію вищої освіти» вперше заговорили в розвинених країнах у 60-ті роки ХХ ст. Це було пов'язано з пониженням статусу вищої освіти: тобто умови вступу спростилися і отримання вищою освіти полегшилося і стало звичайним явищем. В цілому це було результатом комерціалізації вищої освіти [5].

Так сталося, що масовізація вищої освіти стала закономірним явищем у системі освіти України після набуття самостійності держави у 90-х роках. Це явище, має як, безсумнівно, позитивні наслідками, так і певні негативні, в тому числі, головними є дисбаланс ринку праці, структурні проблеми підготовки фахівців у закладах вищої освіти і основне, зниження якості навчання. Ці негативи будуть впливати на цілий ряд інших проблем, а саме, зростання рівня безробіття, а значить – соціальне розчарування серед освіченого населення; підвищення напруженості в суспільстві; незабезпеченість української економіки фахівцями актуальних професій.

Тому, сьогодні, одним із важливих завдань державної освітньої політики є зведення нанівець, або мінімізувати ризики і загрози масовізації вищої освіти в Україні [6]. Тим паче, важливо зазначити, що мотивації отримання вищої освіти в Україні не типові, а часто і зовсім гіпертрофовані.

В Україні масовізація вищої освіти має свою специфіку, зокрема, її престижність, та змагальність, навіть, не тільки серед вишів, а і факультетів вишу, інколи без орієнтації на потреби ринку праці, часто, як данина моді, що не може не створювати проблем в суспільстві, а зараз, в умовах війни,

посилюється ще і цим фактором.

Таким чином, конкретизуємо, масовізація вищої освіти, окрім очевидних пріоритетів, плюсів, що проявляється у підвищенні якості людського ресурсу країни, сприяє вільному розвитку особистості, розширює можливості людини та «входження» її у суспільство і світ, встигаючи за їх динамікою. В той же час, масовізація може мати і, здавалося би, несподівані загрози. В тому дисбаланс ринку праці та у структурі підготовки фахівців у вишах призводи до високого рівня безробіття серед громадян з вищою освітою. Серед зареєстрованих у Державній службі зайнятості, приблизно 48 % безробітних осіб мають диплом про вищу освіту. У великих містах – Києві, Одесі, Харкові, Львові – цей показник сягає 85-90 %. За словами керівництва Держслужби зайнятості причина високого показника безробіття серед громадян з вищою освітою полягає в тому, що вища школа не завжди встигає за потребами ринку праці в Україні: як наслідок професійно-кваліфікаційна розбалансованість, і це може мати соціальні наслідки.

Практика показує, що українській економіці «тут і зараз» (*here and now*) не потрібна багато фахівців з вищою освітою, у першу чергу з так званих «модних» професій. Наше господарство (і не тільки наше, а у багатьох країнах світу) влаштоване так, що йому необхідні також і фахівці робітничих професій, у нас вони вже давно в дефіциті.

В Україні, на жаль, так ментально склалося, за роки незалежності, що до 80% випускників шкіл намагаються вступити до ЗВО, (яких необґрунтовано багато) і лише менше 30 % отримують професійну освіту. Зовсім протилежна тенденція в країнах Європи: там до 30 % випускників шкіл вступають до ЗВО, а 70 % отримують професійну освіту [7].

Масовізація вищої освіти не може не призвести, в наших реаліях, до зниження якості вищої освіти. Тут є дві основні причини: перша – зниження середнього рівня якості середньої освіти, а значить і

когнітивного потенціалу студентів; друга – неможливість наявними освітніми ресурсами (інфраструктура ЗВО, усталені форми освітнього процесу) забезпечити якісну освіту для швидко зростаючої кількості студентів при прискорених темпах оновлення знань та динаміці соціально-економічних змін у сучасному світі. Зниження середнього рівня когнітивного потенціалу студентів пов'язане із послабленням селекційних вимог при вступі до ЗВО.

Як зазначалося вище, що чисельність вишів в Україні не обґрунтовано велика, що показало тенденцію, починаючи з 2000-х років кількість прийнятих на навчання до університетів, академій та інститутів почала перевищувати кількість випускників шкіл, які отримали атестат про загальну середню освіту. А більш низький середній рівень випускників школи призводить до відповідного зниження базових знань абітурієнтів, і відповідно студентства, що неминуче потребує зниження рівня складності навчального матеріалу, рівню вимог, і негативно позначається на якості освіти в цілому.

Ми вже згадували деякі альтернативні вищій освіті форми, однією, з яких є дуальна освіта. Кордони дуальної освіти передбачають органічне об'єднання роботи з навчанням, коли молодого фахівця заклад освіти готує разом з підприємством. Підприємство визначає, спеціалісти, яких спеціальностей та в якій кількості йому потрібні, і замовляє їх вищому навчальному закладу. Здобувач вищої освіти поєднує навчання з виробничою практикою на підприємстві. Саме дуальна освіта, як конкурентна, буде сприяти реалізації таких задач: оновлення освітніх програм під вимоги ринку праці; підвищити якість усього освітнього процесу; посилити зв'язки вишів з підприємствами та впливу їх ролі на освітній процес; підвищити мотивацію студентів; вплинути на зростання рівня зайнятості молоді; скоротити адаптаційний період після влаштування на роботу.

У сучасних умовах, і світовий досвід, і досвід України показали, що онлайн

технології, фактично сформували модерний освітній, організаційно-методичний ресурс, який дає можливість здійснювати освітній процес дистанційно, і це не тільки у закладах вищої освіти. В реальному житті маємо справу з різноманітними, масовими освітніми онлайн курсами, які сьогодні дуже швидко розвиваються. «Вагомими факторами зростання ринку онлайн освіти є гнучкість навчання, низька вартість, доступність, швидке збільшення кількості користувачів Інтернету. За роки свого існування (з 2012 року) масові відкриті онлайн курси охопили 900 університетів і зібрали 101 млн користувачів з усього світу» [8].

Міністерство освіти і науки України також має співпрацю з платформою онлайн-освіти «Coursera». Заклади вищої освіти та студенти, можуть безоплатно користуватися курсами Coursera for Campus. МОН розпочало співпрацю з платформою з березня 2022 року. За цей час 250 українських закладів вищої освіти отримали необмежений доступ до 8 700 курсів. А понад 56 000 українських слухачів уже пройшли 180 000 курсів та отримали сертифікати [9].

Ще і такий варіант має місце, коли, частково випускники шкіл відразу влаштовуються на роботу і починають власне трудове життя. В основному, вважають, що їм просто не потрібна вища освіта, вони мають власні погляди на свою кар'єру, а відвідування вишу є даремною витратою часу, хоча, є і такі, які не можуть оплатити навчання, що виш їм не по кишені.

При цьому наводячи приклади тих видатних і відомих особистостей, які за рахунок закінченої вищої освіти вибрали розвиватися в бізнесі і неймовірно досягли в цьому успіху. Крім широко відомих Білла Гейтса і Стіва Джобса, свою успішну кар'єру з незакінченою вищою освітою, серед інших володарів багатомільйонного стану, побудували засновник Twitter Джек Дорсі, засновники компаній – Dell Майкл Делл і Oracle Corporation – Ларрі Еллісон [7].

І таких прикладів доволі багато, що коли людина маючі власні оригінальні ідеї,

організаційні здібності, стартовий капітал здатні втілити в життя свої проекти, досягти успіху, і зайвий раз підтвердити факт багатогранності реалій, що може бути і так. Але це скоріше винятки.

Наш час – це час змін у всіх відношеннях і ті принципи освіти, які діяли на протязі декількох століть, і які сформувалися в епоху Просвітництва сьогодні поставлені під сумнів. Врешті-решт, виникає запитання: «а чи потрібна вища освіта сьогодні?» Потрібні нові уніфіковані підходи до раціональної організації освіти.

Повертаючись до дослідження української платформи Harry Monday подивимось на результати опитування з питання «вищій освіті бути чи не бути?» 64,7 % респондентів вважають, що все залежить від професії, і цих респондентів ми попросили назвати кілька варіантів, де без вищої освіти точно не обійтися.

Види діяльності, де, на думку опитаних, вища освіта є обов'язковою:

- медицина/фармацевтика (97,6 %);
- юридична справа (86,8 %);
- освіта й наука (85,8 %);
- психологія/психотерапія (81,5 %);
- архітектура (69 %);
- фінансова справа (66,1 %);
- робота з текстами (29,1 %);
- менеджмент (26,4 %);
- технічне ІТ (21,2 %);
- дизайн (8,9 %);
- проєктний/продуктовий менеджмент (6 %);
- HR/рекрутинг (5,3 %);
- власний бізнес (5,3 %);
- маркетинг (4,8 %);
- сфера обслуговування (2,2 %);
- продажі (1,4 %).

В викритому питанні респонденти назвали деякі професії, які не були перелічені: філософія, інженерна справа, ветеринарна медицина, екологія, будівництво, харчові технології, технології виробництва, військова справа, міжнародні відносини, культурологія, високі технології, реставрація, транспортна справа,

природничі спеціальності, мистецтво [2].

Так, відповідальне можна стверджувати, що вища освіта не просто про здобуття диплому, вона сприяє формуванню світогляду людини, озброює її не тільки професійними і гуманітарними знаннями, а сприяє становленню цілісної особистості. Вона є основою для розвитку наукового мислення та формує навички критичного аналізу, що надважливо, актуально в сучасному швидкоплинному світі, не зважаючи на велику кількість її альтернатив, не всупереч одне одному, а в комплексі, разом.

Цікаво, як на це питання відповів штучний інтелект.

Коли вища освіта потрібна.

1. Професії, що вимагають ліцензії або сертифікації: медицина, право, інженерія, архітектура, викладання. Без диплома просто не допустять до професійної практики.

2. Глибоке розуміння теорії: для наукових або аналітичних професій потрібні фундаментальні знання.

3. Кар'єрне зростання в корпоративному середовищі: у багатьох компаніях диплом – формальна вимога для підвищення.

4. Нетворкінг: університет – це не лише знання, а й знайомства, які можуть дати поштовх кар'єрі.

Коли вища освіта не обов'язкова.

1. Практичні професії або ремесла:

2. ІТ (особливо програмування), дизайн, SMM, маркетинг, підприємництво – часто оцінюють портфоліо, а не диплом.

3. Швидкі зміни у сфері. Наприклад, у сфері технологій знання застарівають

швидше, ніж змінюються програми в університетах.

4. Альтернативні джерела освіти: онлайн-курси, буткемпи, самоосвіта, менторство часто дають ефективніші навички в коротший термін.

5. Висока вартість і час: у деяких країнах університет – дуже дороге задоволення, а окупність не гарантована.

Вища освіта не є обов'язковою для успіху, але вона може бути дуже корисною – залежно від твоїх цілей, сфери діяльності та способу навчання [10].

Практично це співпало з думкою молодих українців.

Висновки

На сучасному етапі українське суспільство зіштовхується з різноманітними викликами, які пов'язані з війною, внутрішньою та зовнішньою міграцією, ніхто не відміняв науковий та технічний прогрес, глобалізаційні зміни, вища освіта просто приречена встигати за цими змінами, і в першу чергу в бік якості, модерності, де вона програє закордонним вишам і її альтернативам, але більш сучасним в Україні.

Світ – це велике коло можливостей для кожної людини і вища освіта залишається важливим, але не єдиним шляхом до успіху. Слід мати на увазі, що розвиток особистості, навчання, практичні навички, контакти з іншими учасниками соціуму призведуть до кар'єрного зростання та особистого успіху, але слід пам'ятати, що вища освіта це той перший крок, який допоможе молодій людині визначити своє місце на шляху здобуття знань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про вищу освіту». *Відомості Верховної Ради (ВВР)*. 2014. № 37–38. Ст. 2004.
2. Пасенко Н. Що не так (або так) із вищою освітою? URL: <https://happymonday.ua/chy-potribna-vyshcha-osvita-rezultaty-opytuvannia>
3. Вища освіта – необхідність чи побажання. Український гуманітарний інститут. URL: <E:/Desktop/Звіт%202024-2026>
4. За межами диплома : чи надає вища освіта перевагу на ринку праці. URL: <work.ua/ru/articles/self-development/3229/>
5. Захарін С. Негативні наслідки «масовізації» вищої освіти. URL: <https://osvita.ua/blogs/78282/>
6. Карпенко М. М. Проблеми масовізації вищої освіти в Україні. Національний інститут стратегічних досліджень. *Серія : Гуманітарний розвиток*. 2019. № 6. С. 4–5.

7. Чи потрібна вища освіта? Шанси на успішну кар'єру без диплому. URL: Vonahub.org.ua
8. Coursera продовжує безкоштовний доступ для ЗВО України 07.03.2024. URL: mooc4ua.Online/news/17
9. URL: [Що надає вища освіта/uk.nure.info/ввод/207](http://Що_надає_вища_освіта/uk.nure.info/ввод/207)
10. URL: <https://chatgpt.com/c/6846f213-30d4-8008-bd6a-7784479e33d3>

REFERENCES

1. *Zakon Ukrainy "Pro vyshchu osvitu"* [Law of Ukraine "On Higher Education"]. *Vidomosti Verkhovnoyi Rady (VVR)* [Bulletin of the Verkhovna Rada (VVR)]. 2014, no. 37–38, Art. 2004. (in Ukrainian).
2. Pasenko N. *Shcho ne tak (abo tak) iz vyshchoyu osvitoyu?* [What is wrong (or right) with higher education?]. URL: <https://happymonday.ua/chy-potribna-vyshcha-osvita-rezultaty-opytuvannia> (in Ukrainian).
3. *Vyshcha osvita – neobkhdnist' chy pobazhannya* [Higher education – necessity or desire]. Ukrainian Humanitarian Institute. URL: [E:/Desktop/Report%20 2024-2026](E:/Desktop/Report%202024-2026) (in Ukrainian).
4. *Za mezhamy diploma : chy nadaye vyshcha osvita perevahu na rynku pratsi* [Beyond the diploma : does higher education provide an advantage in the labor market]. URL: work.ua/ru/articles/self-development/3229/ (in Ukrainian).
5. Zakharin S. *Nehatyvni naslidky "masovizatsiyi" vyshchoyi osvity* [Negative consequences of the "massification" of higher education]. URL: <https://osvita.ua/blogs/78282/> (in Ukrainian).
6. Karpenko M.M. *Problemy masovizatsiyi vyshchoyi osvity v Ukraini* [Problems of massification of higher education in Ukraine]. *Natsional'nyy instytut stratehichnykh doslidzhen'. Seriya : Humanitarnyy rozvytok* [National Institute for Strategic Studies. Series : Humanitarian Development]. 2019, no. 6, pp. 4–5. (in Ukrainian).
7. *Chy potrebna vyshcha osvita? Shansy na uspishnu kar"yeru bez dyplomu* [Is higher education necessary? Chances of a successful career without a diploma]. URL: Vonahub.org.ua (in Ukrainian).
8. *Coursera prodovzhuje bezkoshtovnyy dostup dlya ZVO Ukrainy 07.03.2024* [Coursera continues free access for higher education institutions of Ukraine 07.03.2024]. URL: mooc4ua.Online/news/17 (in Ukrainian).
9. URL: [What does higher education provide/uk.nure.info/ввод/207](http://What_does_higher_education_provide/uk.nure.info/ввод/207) (in Ukrainian).
10. URL: <https://chatgpt.com/c/6846f213-30d4-8008-bd6a-7784479e33d3> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 21.10.2025.

УДК 519.6:519.8:628.83

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.241225.42.1208

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ АЕРОІОНІВ В РОБОЧОМУ ПРИМІЩЕННІ : РІШЕННЯ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ

БІЛЯЄВ М. М.^{1*}, *докт. техн. наук, проф.*,
БІЛЯЄВА О. М.², *студ.*

^{1*} Кафедра гідравліки, водопостачання та фізики, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту», вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: biliaiev.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

² Факультет прикладної математики, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, проспект Науки, 72, Дніпро, 49000, Україна, тел. +38 (056) 373-15-09, e-mail: vikabelyaeva604.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1859-8531

Анотація. Постановка проблеми. Розглядається процес іонізації повітря в робочому приміщенні. Ставиться задача визначення оптимального місця розташування іонізатору в робочій зоні. **Мета роботи.** Розробка CFD моделі на базі спряженого рівняння для обґрунтування оптимального міста розташування іонізатора в приміщенні. **Методика.** Для рішення спряженого рівняння використовуються дві кінцево-різницеві схеми. Перша чисельна модель побудована на базі змінно-трикутної схеми розщеплення. Друга чисельна модель базується на рішенні рівняння масопереносу відносно прирощення невідомої функції. Рішення задачі аеродинаміки здійснюються шляхом чисельного інтегрування рівняння Лапласу для потенціалу швидкості. Розроблені чисельні моделі аеродинаміки враховують положення отворів системи вентиляції, наявність перешкод (наприклад, меблі) в робочому приміщенні, кратність повітрообміну. Для чисельного інтегрування рівняння для потенціалу швидкості використовується ідея встановлення рішення за часом. Чисельне інтегрування здійснюється на базі метода розщеплення. Використовуються дві кінцево-різницеві схеми розщеплення. На кожному кроці розщеплення розрахунок потенціалу швидкості визначається на базі явної формули. **Наукова новизна.** Розроблена CFD модель для рішення задачі оптимізації – визначення оптимального місця розташування іонізатора в робочому приміщенні. Модель базується на чисельному інтегруванні спряженого рівняння масопереносу та рівняння аеродинаміки. Розроблена модель враховує основні фізичні фактори, що впливають на розповсюдження аероіонів в робочому приміщенні (наявність меблі в приміщенні, розташування положення отворів вентиляції тощо). **Практична значущість.** Побудована CFD модель дає можливість лише за один розрахунок визначити місце оптимального розташування іонізатора, яке забезпечує потрібну концентрацію аероіонів в робочій зоні. **Висновки.** Для прогнозу аероіонного режиму в робочому приміщенні та вибору оптимального місця розташування іонізатора розроблена CFD модель. Особливістю CFD моделі є можливість врахування основних фізичних факторів, що впливають на формування концентраційних полів аероіонів в робочих приміщеннях. Запропонована CFD модель може бути використана для наукового обґрунтування місць розташування іонізаторів в приміщеннях.

Ключові слова: іонізація повітря; робоча зона; мікроклімат; іонізатор; аеродинаміка приміщень; CFD моделювання

MATHEMATICAL MODELING OF ION DISPERSION IN ROOM : OPTIMIZATION PROBLEM SOLVING

BILIAIEV M.M.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BILIAIEVA O.M.², *Stud.*

^{1*} Department of Hydraulics, Water Supply and Physics, Ukrainian State University of Science and technologies, ESI “Dnipro Institute of Infrastructure and Transport”, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: biliaiev.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1531-7882

² Faculty of Applied Mathematics, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Nauka Ave., Dnipro, 49000, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-09, e-mail: vikabelyaeva604.m@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1859-8531

Abstract. Problem statement. The process of ionization of air in the work area is visible. The task is to determine the optimal location for distributing the ionizer in the work area. **The purpose of the article.** Development of a CFD model based on a conjugated line to determine the optimal location for ionizer placement in the premises. **Methodology.** Two finite-difference schemes are used to solve the conjugate equation. The first numerical model is built on the basis

of an alternating triangular splitting scheme. The second numerical model is based on the solution of the mass transfer equation with respect to the increment of the unknown function. The aerodynamic problem is solved by numerically integrating the Laplace equation for the velocity potential. The developed numerical aerodynamic models take into account the position of the ventilation system openings, the presence of obstacles (for example, furniture) in the working room, and the multiplicity of air exchange. For numerical integration of the equation for the velocity potential, the idea of establishing a solution over time is used. Numerical integration is carried out on the basis of the splitting method. Two finite-difference splitting schemes are used. At each step of the splitting, the calculation of the velocity potential is determined on the basis of an explicit formula. **Scientific novelty.** The CFD model has been expanded to solve the optimization problem – determining the optimal location for ionizer placement in the working area. The model is based on the numerical integration of the conjugate equation of mass transfer and the equation of aerodynamics. The model has been broken down into the main physical factors that influence the distribution of aeroions in the work area (the presence of furniture in the area, the position of the ventilation openings, etc.). **Practical significance.** The CFD model makes it possible to determine in just one step the place for optimal expansion of the ionizer, which will ensure the required concentration of aeroions in the working area. **Conclusions.** A CFD model has been developed to predict the air ion regime in a working room and select the optimal location of the ionizer. A feature of the CFD model is the ability to take into account the main physical factors that influence the formation of air ion concentration fields in working rooms. The proposed CFD model can be used to scientifically substantiate the locations of ionizers in rooms.

Keywords: *ionization of the air; work zone; microclimate; ionizer; aerodynamics; CFD modeling*

Постановка проблеми. Прогнозування мікроклімату в робочих приміщеннях відноситься до актуальних прикладних задач в області охорони праці [1–5]. Відомо, що іонізація повітря є одним з важливих способів поліпшення стану мікросередовища у робочих зонах. Так житлові комплекси класу «люкс» за кордоном вже надають квартири з вбудованими іонізаторами повітря, тому що наявність таких пристроїв тепер також обов'язково як і наявність системи водопостачання та каналізації у квартирі.

Для створення певного аероіонного режиму у робочих зонах використовують іонізатори повітря. Однак вибір розташування іонізатора повітря в робочому приміщенні – нетривіальне завдання. Це пов'язано з тим, що, по-перше, необхідно забезпечити необхідну (оптимальну) концентрацію іонів на робочому місці, а з іншого боку – на процес формування концентраційних полів іонів у приміщенні впливає велика кількість факторів (повітрообмін, положення отворів вентиляції, наявність меблів у приміщенні тощо). Таким чином, з'являється завдання оптимізації – вибір раціонального розташування іонізатора в робочому приміщенні за умови, що концентрація іонів у робочій зоні має обмеження за величиною.

Як приклад такого завдання, на рисунку 1 показана робоча зона, де розташовані стіл

і стілець, і розглядаються 3 можливих варіанти місця розташування іонізатора в робочому приміщенні:

- варіант № 1 – іонізатор на стелі;
- варіант № 2 – на полиці (бічна стінка приміщення);
- варіант № 3 – на шафі;
- варіант № 4 – не одне місце не підходить для розміщення іонізатора обраного типу.

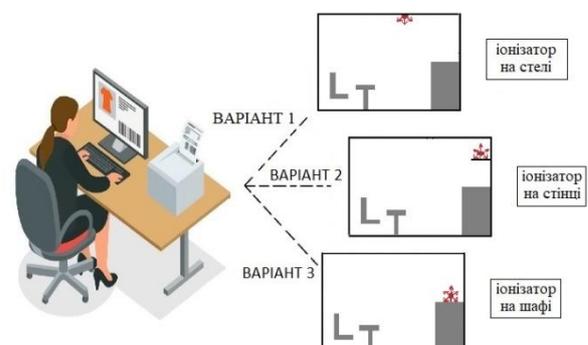


Рис. 1. Вибір місця розташування іонізатору

Потрібно визначити в якому місці розташування іонізатора буде забезпечена необхідна концентрація іонів у робочій зоні і, не виключено (варіант № 4), що такого місця в приміщенні «не буде» для моделі іонізатора, що розглядається.

Таким чином, місце розміщення іонізатора у робочому приміщенні – невідоме і потрібно визначити область його розміщення, за умови забезпечення у робочій зоні (органи дихання працівника)

такої концентрації негативних аероіонів, яка відповідає діапазону рекомендованих значень. Розв'язанню задачі щодо визначення концентрації іонів при заданому положенні іонізатора присвячено роботи в [2–12]. Особливістю методів, що використовують у цих роботах є те, що розв'язання задачі щодо визначення оптимального місця розміщення іонізатора, базується на вирішенні «прямого» завдання, а саме – здійснюється розрахунок концентраційного поля іонів у приміщенні для різних варіантів розташування пристрою. Тобто, проводиться серія розрахунків шляхом «перебору» варіантів різного розташування приладу. У випадку, що розглядається (рис. 1) – потрібно три рази здійснити розрахунок концентраційного поля аероіонів для трьох обраних місць можливого розташування пристрою (рис. 1). Далі, аналізуючи концентраційні поля іонів в робочій зоні для кожного розглянутого варіанту розташування іонізатору визначається його положення (або відсутність такого положення пристрою) в робочому приміщенні. В даній роботі розглядається інший підхід для рішення задачі по обґрунтуванню місця розташування іонізатору в робочому приміщенні – це розрахунок на базі спряженого рівняння переносу. При такому підході потрібно зробити лише *один* розрахунок, а не серію розрахунків, для визначення оптимального місця розташування іонізатору.

Мета статті – розробка чисельної (CFD) моделі на базі спряженого рівняння для обґрунтування оптимального місця розташування іонізатора в приміщенні.

Методика. Визначення оптимального місця розташування іонізатору в робочому приміщенні базується на рішенні спряженого рівняння (1) (Г. І. Марчук):

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial C^*}{\partial t} - \frac{\partial u C^*}{\partial x} - \frac{\partial v C^*}{\partial y} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C^*}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C^*}{\partial y} \right) + p, \end{aligned} \quad (1)$$

де C^* – функція, спряжена з функцією C (C – концентрація негативних іонів в повітряному середовищі), p – деяка функція.

Оберем наступний вид функції p (Г. І. Марчук):

$$p(x, y, t) = \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(t - \tau). \quad (2)$$

За такого вибору функції p значення функціоналу:

$$I = Q \int_0^T C^*(r_0, t) dt,$$

буде відповідати значенню концентрації негативних іонів у точці реципієнта ($r_0 = x_0, y_0$) (у робочій зоні).

Тоді, для вирішення задачі оптимізації необхідно:

1. чисельно вирішити пов'язане рівняння (1) з умовою (2);

2. побудувати поле (ізолінії) функціоналу I .

3. знайти розв'язання задачі (координати x_0, y_0 – місця оптимального розміщення іонізатора повітря) з умов:

$$I(x_0, y_0, t) < C_N, \quad (3)$$

де C_N – потрібна концентрація іонів у реципієнта в робочій зоні. Наприклад, це може бути рекомендована концентрація негативних іонів у робочій зоні: $3\,000$ іон/см³ – $5\,000$ іон/см³.

У спряженому рівнянні (1) використано значення компонент вектора швидкості повітряного середовища u, v які визначаються шляхом вирішення задачі аеродинаміки приміщень.

Граничні умови для спряженого рівняння (1) мають вигляд (Г. І. Марчук):

$$\mu \frac{\partial C^*}{\partial n} + u_n C^* = 0 \text{ на } \Sigma \text{ при } u_n \geq 0,$$

$$C^* = 0 \text{ на } \Sigma \text{ при } u_n < 0,$$

$$\frac{\partial C^*}{\partial n} = 0 \text{ на твердих поверхнях,}$$

$$C^*(x, y, T) = C^*(x, y, 0).$$

Для рішення задачі аеродинаміки повітряного потоку в приміщенні при роботі вентиляції) використовується рівняння Лапласу (2) для потенціалу швидкості:

$$\frac{\partial P^2}{\partial x^2} + \frac{\partial P^2}{\partial y^2} = 0. \quad (4)$$

Для рівняння (4) ставляться такі граничні умови:

– на межі, де потік входить у розрахункову область (отвори вентиляції), для потенціалу швидкості ставиться гранична умова Неймана $\frac{\partial P}{\partial x} = V$, де V – відоме значення швидкості вітрового потоку;

– на межі, де потік виходить з розрахункової області (відповідні отвори вентиляції), для потенціалу швидкості ставиться гранична умова Діріхле $P = P_0 + const$, де P_0 – деяка числова константа;

– на верхній межі, тверда непроникна стінка, ставиться умова непроникнення $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$;

– на нижній межі, тверда непрозора стінка, ставиться умова непроникнення $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$;

– на всіх твердих стінках (меблі, обладнання) виконується умова непроникнення.

Якщо відоме поле потенціалу швидкості, то для визначення компонент вектору швидкості повітряного потоку використовуються такі залежності:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, v = \frac{\partial P}{\partial y}.$$

Чисельна модель. Чисельне інтегрування рівняння (2) здійснюється за допомогою двох різницевоїх схем. Попередньо, рівняння для потенціалу швидкості (4) приводиться до вигляду (5):

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (5)$$

де η – фіктивний час.

При $\eta \rightarrow \infty$ розв'язок рівняння (5) прагнучиме «встановлення», тобто. до розв'язання рівняння Лапласа (4).

На наступному етапі будується локально-одномірною кінцево-різницева схема (перша чисельна модель аеродинаміки). Для цього здійснюється геометричне розщеплення рівняння (5) таким чином:

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}. \quad (7)$$

Далі, значення потенціалу P у центрі різницевоїх осередків визначається за явною залежністю (для рівняння (6)):

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + V\eta \frac{P_{i+1,j}^n - P_{i,j}^n}{\Delta x^2} + V\eta \frac{-P_{i,j}^n + P_{i-1,j}^n}{\Delta x^2}.$$

Для чисельного розв'язання рівняння (7) використовується наступна залежність:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^n + V\eta \frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n}{\Delta y^2} + V\eta \frac{-P_{i,j}^n + P_{i,j-1}^n}{\Delta y^2}.$$

Таким чином, значення потенціалу швидкості на кожному дробовому кроці визначається за очевидною схемою. Розрахунок за цими залежностями закінчується під час виконання умови:

$$\left| P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n \right| \leq \varepsilon, \quad (8)$$

де ε – мале число (приймається $\varepsilon = 0,001$; n – номер ітерації (кількість кроків за «часом»)).

Гранична умова непротікання на твердих стінках реалізується шляхом застосування фіктивних різницевоїх комірок.

Для проведення розрахунків потрібно знати поле потенціалу швидкості для $\eta = 0$. Наприклад, можна прийняти: $P = 0$.

Значення компонентів вектору швидкості розраховується на сторонах різницевих комірок наступним чином:

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad (9)$$

$$v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}. \quad (10)$$

Також побудована друга чисельна модель аеродинаміки. Для цього використовується наступна апроксимація рівняння (5):

$$\begin{aligned} P_{i,j}^{n+1} = & P_{i,j}^n + V\eta \frac{P_{i+1,j}^n - P_{i,j}^n}{\Delta x^2} + \\ & + V\eta \frac{-P_{i,j}^n + P_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + \\ & + V\eta \frac{-P_{i,j}^n + P_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} + \\ & + V\eta \frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n}{\Delta y^2} +. \end{aligned}$$

Поле компонент вектору швидкості повітряного середовища $u(x,y)$, $v(x,y)$, визначено за залежностями (9), (10).

Дотримуючись Г.І. Марчука для чисельного розв'язання спряженого рівняння (1) необхідно запровадити нові змінні:

$$u' = -u, \quad v' = -v, \quad t' = T - t.$$

Тогда, при использовании новых переменных, сопряженное уравнение (1) принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C^*}{\partial t'} + \frac{\partial u C^*}{\partial x} + \frac{\partial v C^*}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C^*}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C^*}{\partial y} \right) + p, \end{aligned} \quad (11)$$

Далі, здійснюється розщеплення рівняння (11):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial u C}{\partial x} + \frac{\partial v C}{\partial y} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial C}{\partial y} \right),$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = p. \quad (13)$$

Для чисельного інтегрування рівнянь (12) використовується змінно-трикутна схема розщеплення (перша чисельна модель).

Принцип побудови другої схеми чисельного інтегрування першого рівняння (рівняння конвективного переносу) розглянемо на модельному рівнянні переносу:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + a \frac{\partial C}{\partial x} = 0, \quad (14)$$

де $a > 0$.

Представимо функцію $C(x,t)$, значення якої необхідно визначити на новому часовому кроці t^{n+1} , так (М. М. Беляєв, В. К. Хрущ):

$$C(x,t^{n+1}) = C(x,t^n) + VC(x,t),$$

де $C(x,t^n)$ – відоме значення функції C ; $VC(x,t)$ – невідоме значення приросту функції C .

Тоді, рівняння (14) можна записати так:

$$\frac{\partial VC}{\partial t} + a \frac{\partial VC}{\partial x} = -a \frac{\partial C^n}{\partial x}. \quad (15)$$

В різницевий аналог рівняння (15) має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{VC_i^{n+1} - VC_i^n}{\Delta t} + a \frac{VC_i^{n+1} - VC_i^{n+1}}{h_x} \beta = \\ = -a \frac{C_{i+1}^n - C_{i-1}^n}{2h_x}. \end{aligned} \quad (16)$$

де $\beta = 0,5$.

Невідоме значення VC знаходиться за явної формулою з (16). Далі, визначається значення функції C на часовому кроці t^{n+1} :

$$C_i^{n+1} = C_i^n + VC_i^{n+1}.$$

Таким самим шляхом побудовано чисельну модель для інтегрування двовимірного рівняння переносу (12). Для чисельного інтегрування другого рівняння з системи (12) – рівняння дифузії, використовується явна різницева схема.

Здійснена програмна реалізація побудованих чисельних моделей.

Результати. На базі розроблених чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу був проведений обчислювальний експеримент. Схема розрахункової області показана на рисунку 2. У приміщенні є робоча зона в якій розташований стілець та стіл.

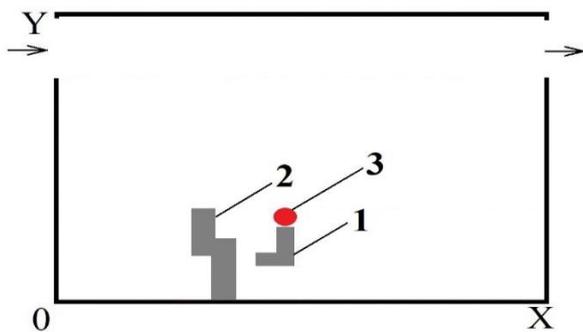


Рис. 2. Схема робочого приміщення: 1 – стілець; 2 – стіл з обладнанням; 3 – положення голови працівника

Математичне моделювання проведено за таких параметрів: розміри розрахункової області 15м*6м; коефіцієнти турбулентної дифузії приймаються $\mu_x = ku$, $\mu_y = kv$ ($k = 0,2$); кратність повітрообміну дорівнює 3; для іонізації повітря планується використання іонізатора, який має інтенсивність $25 \cdot 10^8$ негативних іонів за секунду.

На рисунку 3 показано розподіл швидкості повітряного потоку у робочій зоні на висоті 0,15 м над головою співробітника.

Дані на рисунку 3 показують, що у робочій зоні швидкість повітряного потоку не перевищує значення нормативної величини 0,2 м/с.

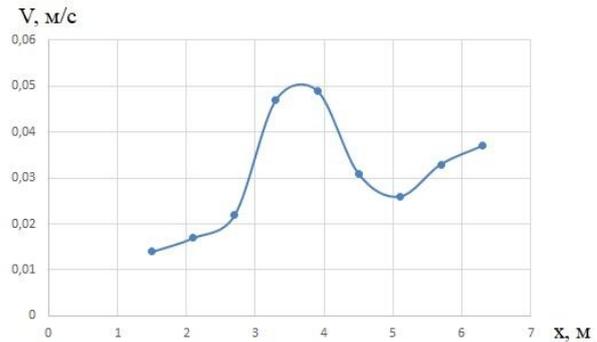


Рис. 3. Розподіл швидкості повітряного потоку в робочій зоні на висоті 0,15 м над головою співробітника

Далі, на матриці (рис. 4) показано значення функціоналу в робочому приміщенні. Кожне число рисунку (матриці) є безрозмірне значення функціоналу. Цей функціонал, в рамках задачі, що розглядається, – відповідає безрозмірному значенню концентрації негативних іонів у реципієнта (позиція 3, рис. 2). Фізичний зміст кожного значення функціоналу такий – якщо помістити іонізатор у цю точку, то працівник перебуватиме в області з такою концентрацією негативних іонів. Значення функціоналу (концентрації) наведено у відсотках від величини максимальної концентрації аероіонів у розрахунковій області – C_{max} . Виведення на друк чисел здійснено за форматом «ціле число», тобто без дробової частини.

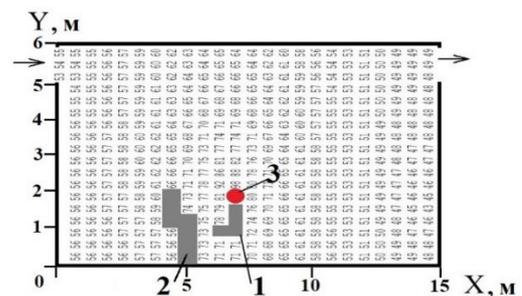


Рис. 4. Матриця значень функціоналу для вибору місця розташування іонізатора ($C_{max} = 7574$ часток/см³):

1 – стілець; 2 – стіл із обладнанням;
3 – становище голови співробітника

Таким чином, якщо для розглянутої задачі $C_{max} = 7574$ часток/см³ (позиція «99» на рисунках), то розміщення іонізатора в точці, де значення функціоналу буде рівним, наприклад, «66», створить концентрацію

негативних іонів у реципієнта $C = 0,66 \cdot 7574 = 4998$ часток/см³. Очевидно, що таке значення концентрації негативних іонів відповідає оптимальному режиму іонізації для працівника. З іншого боку, якщо розмістити іонізатор у точках, де значення функціоналу буде «72» і вище, то значення концентрації негативних іонів у реципієнта буде більшим 5 500 часток/см³, тобто більше бажаного діапазону.

Для більшої ясності, нижче, на рисунку 5 показано значення шуканого функціоналу, на певній висоті над головою працівника. Точці «0» відповідає ліва стінка робочого приміщення.

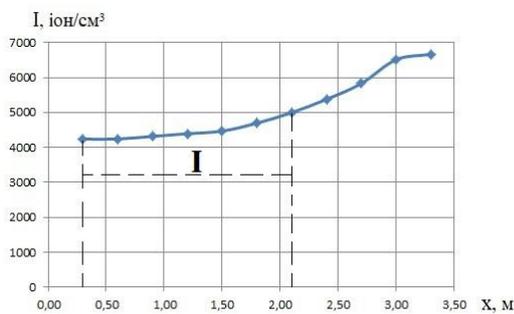


Рис. 5. Значення функціоналу (концентрація іонів) на висоті 0,56 м над головою працівника:
I – область рекомендованого розміщення іонізатора

Аналіз рисунку 5 показує, що якщо обрати рівень, що відповідає висоті 0,56 м над головою працівника, то іонізатор можна розташовувати у будь-якій точці цього рівня до позначки $x = 2$ м від лівої стінки робочого приміщення.

Таким чином, застосування розроблених моделей дозволило за один розрахунок визначити зони раціонального розміщення

іонізатора у приміщенні. Відзначимо, що година розрахунку склала 3 с.

Наукова новизна та практична цінність. Розроблена CFD модель для рішення задачі оптимізації – визначення оптимального місця розташування іонізатора в робочому приміщенні.

Модель базується на чисельному інтегруванні спряженого рівняння масопереносу та рівняння аеродинаміки.

Розроблена модель враховує основні фізичні фактори, що впливають на розповсюдження аероіонів в робочому приміщенні (наявність меблів в приміщенні, розташування положення отворів вентиляції тощо).

Побудована CFD модель дає можливість лише за один розрахунок визначити місце оптимального розташування іонізатора, яке забезпечує необхідну концентрацію аероіонів в робочій зоні.

Висновки

1. Для прогнозу аероіонного режиму в робочому приміщенні та вибору оптимального місця розташування іонізатора розроблена CFD модель.

2. Особливістю CFD моделі є можливість врахування основних фізичних факторів, що впливають на формування концентраційних полів аероіонів в робочих приміщеннях.

3. Запропонована CFD модель може бути використана для наукового обґрунтування місць розташування іонізаторів в приміщеннях.

4. Подальший розвиток цього напрямку – розробка тривимірної CFD моделі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беляев Н. Н., Беляева В. В., Якубовская З. Н. Прогнозирование уровня загрязнения воздушной среды в помещениях. Днепропетровск : Акцент ПП, 2015. 123 с.
2. Глива В. А., Бурдейна Н. Б., Зозуля С. В. Дослідження динаміки аероіонного складу повітря на робочому місці користувача персонального комп'ютера з урахуванням електромагнітних чинників. *Системи управління навігації та зв'язку*. 2022. № 2. С. 99–101. URL: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.2.099>
3. Глива В. А. Дослідження впливу мікрокліматичних параметрів повітрообміну на аероіонний склад повітря робочих приміщень. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2011. Вип. 20. С. 58–65.
4. Запорожець О. І., Глива В. А., Сидоров О. В. Принципи моделювання динаміки аероіонного складу повітря у приміщеннях. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2011. № 2. С. 120–124.
5. Сукач С. В., Сидоров О. В. Методологічні засади підвищення якості контролю аероіонного складу повітря виробничого середовища. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2016. № 32. С. 127–133.
6. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Київ : Наукова думка, 1997. 368 с.

7. Bolibrukh B., Glyva V., Kasatkina N., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Bogatov O., Petrunok T., Aznaurian I., Zozulya S. Monitoring and management ion concentrations in the air of industrial and public premises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. № 1 (10 (115)). Pp. 24–30. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253110>
8. Fletcher L. A., Noakes C. J., Sleigh P. A., Beggs C. B., Shepherd S. J. Air ion behavior in ventilated rooms. *Indoor and Built Environment*. 2008. Vol. 17, № 2. Pp. 173–182.
9. Fletcher L. A., Gaunt L. F., Beggs C. B., Shepherd S. J., Sleigh P. A., Noakes C. J., Kerr K. G. Bactericidal action of positive and negative ions in air. *BMC Microbiology*. 2007. Vol. 7:32.
10. Noakes C. J., Sleigh P. A., Beggs C. B. Modelling the air cleaning performance of negative air ionisers in ventilated rooms. *Proceedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms*. Roomvent 2007, 13–15 June 2007, Helsinki.
11. Noakes C. J., Beggs C. B., Sleigh P. A. Modelling the performance of upper room ultraviolet germicidal irradiation devices in ventilated rooms : comparison of analytical and CFD methods. *Indoor and Built Environment*. 2004. Vol. 13, № 6. Pp. 477–507.
12. Noakes C. J., Sleigh P. A., Fletcher L. A., Beggs C. B. Use of CFD modelling to optimise the design of upper-room UVGI disinfection systems for ventilated rooms. *Indoor and Built Environment*. 2006. Vol. 15, № 4. Pp. 347–356.

REFERENCES

1. Biliaiev M.M., Biliaieva V.V. and Yakubovska Z.N. *Prognozirovaniye urovnya zagryazneniya vozdushnoy sredy v pomeshcheniyakh : monografiya* [Predicting the level of indoor air pollution : monograph]. Dnipropetrovsk : “Aktsept PP”, 2015. (in Russian).
2. Glyva V.A., Burdejna N.B. and Zozulya S.V. *Doslidzhennya dynamiky aeroionnogo skladu povitrya na robochomu misci korystuvacha personalnogo kompyutera z uraxuvannyam elektromagnitnykh chynnykiv* [Research on the dynamics of the aeroionic composition of air at the workplace of a personal computer user, taking into account electromagnetic factors]. *Systemy upravlinnya navigaciyi ta zvyazku* [Navigation and Communication Control Systems]. 2022, vol. 2, pp. 99–101. URL: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.2.099> (in Ukrainian).
3. Glyva V.A. *Doslidzhennya vplyvu mikroklimatychnykh parametriv povitroobminu na aeroionnyj sklad povitrya robochyx prymishhen* [Research on the influence of microclimatic parameters of air exchange on the aeroionic composition of air in working spaces]. *Problemy oxorony praci v Ukraini* [Occupational Safety Problems in Ukraine]. 2011, vol. 20, pp. 58–65. (in Ukrainian).
4. Zaporozhecz O.I., Glyva V.A. and Sydorov O.V. *Pryncypy modelyuvannya dynamiky aeroionnogo skladu povitrya u prymishhennyax* [Principles of modeling the dynamics of the aeroionic composition of indoor air]. *Visnyk Nacionalnogo aviacijnogo universytetu* [Bulletin of the National Aviation University]. 2011, no. 2, pp. 120–124. (in Ukrainian).
5. Sukach S.V. and Sydorov O.V. *Metodologichni zasady pidvyshhennya yakosti kontrolyu aeroionnogo skladu povitrya vyrobnychogo seredovyshha* [Methodological principles for improving the quality of control of the aeroionic composition of air in the production environment]. *Problemy oxorony praci v Ukraini* [Occupational Safety Problems in Ukraine]. 2016, no. 32, pp. 127–133. (in Ukrainian).
6. Zgurovskii M.Z., Skopetskii V.V., Khrutch V.K. and Biliaiev M.M. *Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayuschey srede* [Numerical simulation of the spread of pollution in the environment]. Kyiv : Naukova Dumka, 1997, 368 p. (in Russian).
7. Bolibrukh B., Glyva V., Kasatkina N., Levchenko L., Tykhenko O., Panova O., Bogatov O., Petrunok T., Aznaurian I. and Zozulya S. Monitoring and management ion concentrations in the air of industrial and public premises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022, no. 1(10(115)), pp. 24–30. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253110>
8. Fletcher L.A., Noakes C.J., Sleigh P.A., Beggs C.B. and Shepherd S.J. Air ion behavior in ventilated rooms. *Indoor and Built Environment*. 2008, vol. 17, no. 2, pp. 173–182.
9. Fletcher L.A., Gaunt L.F., Beggs C.B., Shepherd S.J., Sleigh P.A., Noakes C.J. and Kerr K.G. Bactericidal action of positive and negative ions in air. *BMC Microbiology*. 2007, vol. 7:32.
10. Noakes C.J., Sleigh P.A. and Beggs C.B. Modelling the air cleaning performance of negative air ionisers in ventilated rooms. *Proceedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms – Roomvent*, 13–15 June 2007, Helsinki.
11. Noakes C.J., Beggs C.B. and Sleigh P.A. Modelling the performance of upper room ultraviolet germicidal irradiation devices in ventilated rooms: comparison of analytical and CFD methods. *Indoor and Built Environment*. 2004, vol. 13, no. 6, pp. 477–507.
12. Noakes C.J., Sleigh P.A., Fletcher L.A. and Beggs C.B. Use of CFD modelling to optimise the design of upper-room UVGI disinfection systems for ventilated rooms. *Indoor and Built Environment*. 2006, vol. 15, no. 4, pp. 347–356.

Надійшла до редакції: 11.10.2025.

УДК 711.11

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.241225.50.1209

ФІЗИЧНИЙ СЕНС ПОНЯТЬ «ДУХ, ДУША І ГЕНЕТИЧНИЙ КОД МІСТА»

ВОРОБІЙОВ В. В.^{1*}, канд. арх., доц.,
ШИЛО О. С.², ст. викл.

^{1*} Кафедра архітектурного проєктування та містобудування, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (068) 424-98-19, e-mail: vivavo151151@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1539-3196

² Кафедра архітектурного проєктування та містобудування, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (098) 212-48-80, e-mail: olgashilo2016@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9869-5474

Анотація. Постановка проблеми. Історично поняття «душа» та «дух» міста існують тисячі років. Вони увійшли до культури націй і народів, у перекази, міфи, легенди та героїчні епоси. Їх використовують для самоідентифікації громадян окремих держав або населення окремих локальних територій. Хоча чітких відповідей на запитання, що є душа і що є дух у фізичному просторі конкретного міста, ніхто не дає. Спроби формулювання відповідей на основі прив'язки до релігійних уявлень про «душу» і «дух» міста взагалі відводять від відповіді, оскільки теологічні доктрини стверджують, що душа і дух не матеріальні, а значить у матеріальному контексті поселень їх шукати не потрібно. Їх там нема. В документах минулого описано, як душі та духу міста поклонялися, як із ними укладали договори про взаємодопомогу. Їхні локації були відомі. Їх охороняли люди, а вони охороняли людей. Разом з тим, сучасні дослідження процесів, пов'язаних з поняттям «душа» та «дух» міста, які виконують академічні та альтернативні вчені, поступово підводять до розуміння того, що сфери існування цих понять перебувають у першоструктурах квантової реальності нашого світу. І навіть глибше. Душу та дух міста вже можна реєструвати науковими приладами. Більше того, завжди були, є і будуть опосередковані, фізично видимі, численні індикатори цих «поза межних» явищ у видимих діапазонах людського буття. Вони є «не приладовими приладами» для виявлення духу, душі і генокоду в забудові будь-якого міста. Таким чином, дві не матеріальні складники – дух і душа – виявляються через матеріальну складову міста – генетичний код планувальної структури. Або наооборот, матеріальний детектор показує присутність не матеріальної «анатомії» міста. Поняття «генетичний код плануючої структури міста» виникло в сімдесяті роки двадцятого століття. Однак, у різних поясненнях та термінах воно було зафіксовано й у давнину. І, тим щонайменше, у трактуванні цього поняття все ще багато різночитань і не чіткості. Настав час описати ці три явища з урахуванням використання сучасних фізичних підходів. **Мета статті** – розкрити фізичний зміст та особливості взаємозв'язку понять «дух», «душа» та «генетичний код» міста.

Ключові слова: дух міста; душа міста; генетичний код міста; взаємозв'язок духу, душі та генетичного коду міста; генеральний план міста; забудова міста

PHYSICAL MEANING OF THE CONCEPTS OF "SPIRIT, SOUL AND GENETIC CODE OF THE CITY"

VOROBIOV V.V.^{1*}, Cand. Sc. (Arch.), Assoc. Prof.,
SHYLO O.S.², Assist. of Prof.

^{1*} Department of Architectural Design and Urban Planning, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (068) 424-98-19, e-mail: vivavo151151@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1539-3196

² Department of Architectural Design and Urban Planning, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (098) 212-48-80, e-mail: olgashilo2016@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9869-5474

Abstract. Statement of the problem. Historically, the concepts of "soul" and "spirit" of a city have existed for thousands of years. They have entered the culture of nations and peoples, into traditions, myths, legends and heroic epics. They are used for self-identification by citizens of individual states or the population of individual local territories. Although no one gives clear answers to the question of what is the "soul" and what is the "spirit" in the physical space of a specific city. Attempts to formulate answers based on religious ideas about the "soul" and "spirit" of

a city generally lead away from the answer, since theological doctrines assert that the soul and spirit are not material, and therefore there is no need to look for them in the material context of settlements. They are not there. Other documents from the past describe how the soul and spirit of the city were worshipped, how mutual aid treaties were made with them. Their locations were known. They were guarded by people, and they guarded people. At the same time, modern research of processes related to the concept of “soul” and “spirit” of the city, carried out by academic and alternative scientists, gradually leads to the understanding that the areas of existence of these concepts are in the primary structures of the quantum reality of our world. And even deeper. They belong to the ranges of energies whose properties go beyond the boundaries of space and time. The soul and spirit of the city can already be registered by scientific instruments. Moreover, there have always been, are and will be indirect, physically visible, numerous indicators of these “beyond” phenomena in the visible ranges of human existence. They are “non-instrument devices” for detecting the spirit, soul and genetic code in the development of any city. Thus, two non-material components – spirit and soul - are manifested through the material component of the city – the genetic code of its planning structure. Or, conversely, a material detector shows the presence of the non-material “anatomy” of the city. The concept of “genetic code of the city planning structure” arose in the seventies of the twentieth century. However, in various explanations and terms it was recorded in ancient times. And, nevertheless, in the interpretation of this concept there are still many different interpretations and ambiguities. It is time to describe these three phenomena based on the use of modern physical approaches. *The aim of the article* is to reveal the physical meaning and features of the interaction of the concepts of “spirit”, “soul” and “genetic code” of the city.

Keywords: *spirit of the city; soul of the city; genetic code of the city; interaction of spirit, soul and genetic code of the city; general plan of the city; city development*

«Незрозуміла штука – душа міста. Ніхто з архітекторів не знає де вона знаходиться. Але всі городяни знають, що вона є».
«Місто без душі – лише холодне каміння. Тільки душа робить місто теплим, людяним та красивим. Якщо місто з душею зруйнувати, воно знову проросте на цьому ж місці»
«Душа міста допомагає йому здобувати перемоги над самим собою»
«Душа справжнього міста є найскладнішим, найніжнішим і найспівучішим музичним інструментом, наданим йому Космосом».

Постановка проблеми. У просторі сучасного міста Дніпро, як і будь-якого іншого міста, одним із ключових моментів, що впливають на його подальшу трансформацію, є поняття «душа міста» та «дух міста» для цієї душі, а також поняття «генетичний код міста» («планувально-генетичний код міста»). Однак чіткого уявлення про ці поняття в контексті архітектури та містобудування у сучасній літературі немає. Як немає і пояснень того, де і за допомогою якихось архітектурних та містобудівних процесів та явищ ці невлімові складові антропогенного світу виявляються.

Мета дослідження полягає в тому, щоб виявити фізичний сенс понять «дух», «душа» і «генетичний код» міста, та пояснити особливості їх взаємодії та взаємообумовленості.

Аналіз публікацій на цю тему показав таке. Поняття «дух» і «душа міста» у сучасній літературі з архітектури та містобудування з позиції їхнього прояву в

матеріальному контенті міста не розкриваються [1; 3–5; 7; 16].

Робляться спроби пов'язати ці поняття з історією культури народу, який живе у конкретному регіоні, через його художнє мислення та світоглядні парадигми, через рефлексії населення на власну соціально-економічну, політичну та технологічну історію, через алгоритми взаємодії з природою [11–13].

Але як саме це проявляється у планувальній структурі міста, у його архітектурі, ясності в публікаціях немає. Щоб отримати відповіді на вирішення цієї проблеми, в деяких країнах почали проводитись регіональні та міжнародні конкурси на тему «Душа міста».

Аналіз матеріалів конкурсів показує, що такі «мозкові атаки» безуспішні через те, що немає чітких формулювань на старті – в умовах конкурсу. Нечіткість зрозуміла: що таке «дух» та «душа» міста не знають ні організатори конкурсів, ні їхні учасники.

Не менш невизначеним є і поняття «генетичний код міста». Охочих вести наукові дослідження на цю тему майже немає. Їх мало. Охочих знайти розуміння суті «генетичного коду міста» через практичну роботу архітектора – трохи більше, але їх осяяння або інсайти поверхові і не повні. Їхні формулювання часто суперечливі. Вони включають різні складові.

Більше того, вони не зважають на головне: поняття «генетичний код міста» – завершальна ланка тріади «дух», «душа» та «генокод...». Тобто генокод є матеріалізованим слідством взаємодії (вкладеності один в одного за певними принципами і правилами) духу і душі міста, є не матеріальною причиною, яка стоїть над матеріальним слідством, породжує його як «генокод міста» [2].

Оскільки дослідники не відкрили цю тріаду з метою пошуку відповіді на питання що ж таке генокод міста, вони також йдуть навпомацки, без чіткого розуміння шляху. Вони намагаються вирішити завдання класу «підди туди, не знаю куди, знайди те, не знаю, що й застосуй там, де не знаю сам». Наприклад, стверджують: генокод міста формується у «точках зростання». Які, своєю чергою, пов'язані зі структурою ландшафту. Однак у місті ландшафту з наукової точки зору, немає за визначенням. Замість нього є або антропогенний ландшафт, або антропогенізований ландшафт. Обидва відрізняються механізмами роботи з антропогенними компонентами так, як земля відрізняється від неба. І обидва не мають нічого спільного з ландшафтами (читати – природними, які мають свою внутрішню топологію, тобто морфоскульптурну диференціацію (підландшафти, геохори, типи та підтипи місцевості, складні та прості урочища, інші; мають свої структури, умови реагування на зовнішні навантаження, свою просторово-часову динаміку), тоді як сам ландшафт – наслідок морфоструктурної диференції регіону, його розподілу на ланки взаємодії ендогенних і екзогенних процесів) [7; 8].

Є твердження і про те, що генокод міста – це його історичне середовище, яке можна «розхитувати» чи зберегти. Але тут все описується без розкриття алгоритму пошуку такого явища у місті, як його «генокод». Та ще й з погляду зв'язку з духом та душею міста.

Спроби знайти аналогії генокоду міста у генокодів нації також не дали конструктивної відповіді для архітекторів практиків. Тут теж пролежується слабка спроба проявити генокод з культурологічного контенту народу, який живе в заданому місці і пройшов через фільтри історії.

У тому числі через розкриття кодів національної орнаменталістики, геометричних форм предметного світу та інших явищ.

Є окремі роботи, які демонструють або душу, або генокод міста як аспект містобудівної та архітектурної міфопоетики. Але без пояснень фізичного сенсу явищ.

Політизація питання про генокод того чи іншого міста – ще один фактор, що відводить убік. Політизація – річ історична, мінлива, яка не завжди породжує завершені архітектурно-містобудівні парадигми, але завжди веде питання про пошук генокоду міста в область суб'єктивних інтересів тих чи інших соціальних груп. Парадокс у тому, що в історії націй та народів не було жодної політики, яка б створила чітко проявлені генокоди міст. Генокоди майже завжди створювали економіки. Політика – служниця економіки. А чи не навпаки. І якщо виникали все-таки зворотні ситуації, то створені ними генокоди міст не мали життєстійкості.

Таким чином, завдання розкриття тріади «дух міста-душа міста-генокод міста» залишається лакуною – областю недослідженого.

Розглянемо ці питання дещо докладніше. Функціонально-планувальна структура будь-якого новоствореного міста завжди пов'язана з фізичними та трансцендентними властивостями світу, що існує в заданому циклі астропланетарних проєкцій екзогенних сил на конкретну географічну точку на поверхні Землі, та

рефлексій на них з боку матриць підземних, наземних та надземних сил ендегенного генези та антропогенного характеру. Сумарно вони генерують адекватні для цього періоду часу та географічного простору рефлексії життя людини інших живих організмів, закладають параметри умов для проживання. Тобто формують плановий малюнок регіональної системи населених місць та місць розташування економічно значущих природно-сировинних ресурсів, кліматичних, гідрографічних та орографічних умов, а також із внутрішньо- та зовнішньополітичними та іншими процесами в країні. Кожне місто як антропогенний ресурс для соціуму теж змінюється.

Всі вони по відношенню до нашого міста в загальних рисах, без розкриття великої групи факторів і процесів, що змінюються, описані в регіональній науково-публіцистичній або науковій літературі. І майже не торкнулися літератури вищого статусу.

Таким чином, усі очевидні зв'язки функціонально-планувальної та об'ємно-просторової структури міста з кожним із факторів не розкривають необхідну повноту особливостей території та пов'язаних з нею ендегенних, екзогенних та антропогенних процесів, що породжують поняття «дух», «душа» та «генокод» планувальної структури міста; не показують, як його зримі (фізичні) та незримі (енергоінформаційні) властивості, визначають морфодинамічні та морфоеволюційні, морфокоеволюційні, морфостагнаційні та морфодеволуційні аспекти формування різних планувальних ділянок у структурі генерального плану міста, а також саму його структуру. Не показують, як планувальна структура міста утворюється на основі законів морфрезонансних відповідностей між природною та антропогенною підсистемами. Не демонструє, за якими законами з позиції резонансної адекватності місто проходить етапи свого розвитку та звивання, перетворення на ціле.

На міжнародному рівні на початку XXI століття було проведено кілька містобудівних конкурсів, які мали на меті виявити, що таке «душа» конкретного міста. Поняття «дух» та «генокод міста» розглядали на локальних рівнях. Перший із конкурсів з виявлення «душі» було проведено для міста Сеул, Південна Корея. Його учасники мали визначити, які архітектурно-містобудівні аспекти «душа міста» має (виявляє з трансцендентності)? Як її у генеральному плані міста виявляти та використовувати?

Дніпропетровська обласна організація національної спілки архітекторів України, якою тоді керував досвідчений архітектор-практик А. Ю. Шковира, спільно з міською адміністрацією Дніпра, теж провела подібний конкурс, який майже одразу був забутий, оскільки ніхто з учасників теж не знав, що є «душа міста»? Мозкової атаки і по відношенню до міста Дніпро не вийшло.

В умовах Дніпровського регіону (як втім, і для масштабів України) питання про «дух» і «душу міста» як не матеріальні явища, теж пов'язані з поняттям «генокод міста» – об'єктом конкретно матеріальним, хоча народжуваним і не матеріальним, що визначається, поки що залишається без теоретичних та практичних відповідей та рекомендацій для діючих архітекторів.

Відповідь на всі ці питання криється у виявленні містобудівних аспектів квантової механіки та інших сучасних наукових теорій, що описують різні рівні організації видимого та невидимого світів, у зв'язку з чим визначення поняття «дух» та «душа міста» є реальним. Вони хоча і пов'язані з трансцендентними світами, але у світі матеріальних, фізичних процесів цілком детектується і досліджується сучасними науковими методами.

Тому в рамках цього дослідження питання їх взаємодії вперше розглянуті як теоретико-прикладні. Одночасно вони стануть компонентами гнозису в загальнофілософському сенсі терміну.

Термін «генокод міста» не має офіційного статусу. Тому не рідко «генокод міста» ігнорується, замовчується, і ніколи не

виявляється через те, що лежить на перетині великої кількості суміжних областей знань, які роблять його міждисциплінарним. Тим часом він існує, про нього говорять відомі теоретики та практики у галузі містобудування. Генокод міста проявляється у структурі генерального плану міста з перших днів свого існування. Генеральний план міста розкривається протягом століть, подібно до маленького зерна будь-якого дерева, наприклад, яблуні, розмір якого всього лише кілька міліметрів, але яке знає, як з себе виростити ціле дерево, яку форму йому надати, скільки гілок і плодів мати, який розмір закласти, як реагувати на зміни погоди і яку тривалість життя його запрограмувати. Після цього дерево має назавжди зникнути. І місто теж не існуватиме далі. Він або зникне, або переродиться на принципово інше явище, що описується вже не містобудівними законами та закономірностями.

Місто з позиції взаємобумовлюючих один одного «духу», «душі» та «генокоду» є процесом трансформації антропогенезу матеріального середовища в історії цивілізації. Після неї піде інша стадія. Як із лялечки народжується метелик, тобто істота зовсім іншої форми і якостей, що живе за іншими правилами життя, так з міста народиться принципово інша фізична структура-сутність. Вона теж має свій час існування. І вона також історично не вічна. Три базові компоненти – «дух», «душа» та «генокод міста» з погляду функціонально-метричної, матеріальної організації міста у просторі та часі явища не постійні.

«Дух» – це поля обертання, які пов'язані з матрицею чарункового каркасу космосу з таких самих полів, що утворюють сітчастоподібні просторові структури. смуги таких сіток сформовані скупченнями галактик. Сітки з таких смуг мають порожнечі в центрах своїх осередків, які називаються войдами. Точки перетину смуг Всесвітньої сітки та центрі осередків, утворених такими смугами є месцями генерації головних за важливістю торсіонів, що утворюють своєрідну душу Світобудови. Яка проектує себе поверхні кожної планети

включаючи Землі, як сітчастоподібного територіального малюнка з особливих енергій.

Торсіони цієї групи вважаються первинними, їх проекції на землю – вторинними. Але є ще вищі рівні «щось», що стоїть над первинними торсіонами. Це щось у стародавніх трактатах називали найчастіше як абсолютну порожнечу, що ніколи не народжувалась і ніколи не вмирає, народжує все і спостерігає за всім, що не ні в що не втручається. Науці ця галузь знань поки що недоступна. Точніше, її вивчає вже квантова механіка, квантова нейрофізіологія та психологія.

Сучасні нейрофізіологи вже впритул підійшли до розуміння цих явищ. Намагаючись знайти місце локації свідомості людини, вони дійшли висновку, що в мозку його немає, але свідомість – ця сама порожнеча, що пронизує весь всесвіт. Хоча сама по собі вона за кордоном матеріального світу. Точніше – матеріальний світ знаходиться в ній.

Всесвіт – це форма гри свідомості. Свідомість всесвіту працює з людиною через торсіони свідомості. Місця, де це проявляється активно, і є локаціями якоїсь душі міст, яка теж у свідомості.

У силу чого віхри можуть вважатися головною одиницею вимірування всього. Торсіон є головною компонентою матриці під назвою «душа» міста.

У кожній географічній точці душа має свої морфометричні проекції (характеристики) в природних та антропогенних матеріальних просторових структурах. До складу характеристик душі міста входить базовий показник – частоти ряду видів енергії, (електромагнітний та інших) виявлених торсіоном, та види їх впливу на рефлексії людини. Які, у свою чергу, потребують відповідної геометрії об'єктів архітектури та містобудування.

Вони підштовхують до прояву особливих станів психіки людини – станів умиротверенності, комфорту, спокою і навіть блаженства та (або) благодаті. Стосовно архітектурних і містобудівних понять це означає одне: геометричні абрис

просторів у точках душі міста мають бути формами-генераторами таких частот. Будь-яка будівля і будь-яке місто або його фрагменти, фактом свого існування генерують якісь частоти. Генерують фактом форми. Які часто не відповідають частотам функціонування організму людини. І лише у разі повного збігу частот і виникають ефекти блаженства та благодаті. Ефекти появи бажань частіше бути і довше перебувати у таких місцях міста. Тут виникає почуття душевного спокою та задоволеності, спокою та гармонії життя,

Фізично знайти місця локації душі міста не важко. Але методика такого пошуку архітекторам – проектувальникам незнайома. Суть пошуку – у формах рельєфу, в основі генези метрики якого інтерференційні процеси в орографії.

Орографія місцевості – наслідок інтерференції кільцевих структур Землі у літосфері. На картах центри кілець такого роду виділяються або точками опуклих форм рельєфу, або пониженнями, які нагадують гігантські блюдця різних розмірів. Галактичні торсіони проєцируються на континенти Землі, сформували своєрідні театри інтерференції в рельєфі. Дроблення рельєфу частини ідеально вторить малюнкам взаємо проникнення кілець. Вся таємниця формоутворення у релефі та малюнку річок – у планограмі інтерференційних процесів. Найпростіший їхній аналог – кола на калюжі під час тремтіння.

Вони перетинають один одного за правилами, що описуються сучасною ритмодинамікою. Якщо в генплані міста матрицю інтерференції побудувати без помилок, не озброєним поглядом стане видно, у яких поєднаннях кіл які планувальні морфотеми міста виникають. У тому числі легко знаходяться точки душі року.

У публікаціях О. С. Шило та В. В. Воробйова, які відкрили явища планувальної інтерференції на рівні регіонів та окремих генеральних планів міст у 2000-х роках, виділено 14 особливих моделей перетину планувальних кілець, які

можуть бути пов'язані і з поняттям «душа» міста.

Ці точки в генеральному плані міста з погляду фізики процесу є місцями в центрах кільцевих стоячих хвиль у рельєфі, а з точки зору динаміки генплану міста утворюють три стани планувального спокою і декілько станів динамічних проявів процесів у забудові міста.

Ці точки в генеральному плані міста з погляду фізики процесу є місцями в центрах кільцевих стоячих хвиль у рельєфі, а з точки зору динаміки генплану міста утворюють три стани планувального спокою і декілько станів динамічних проявів процесів у забудові міста. На основі дослідження цих процесів В. В. Воробйовим та О. С. Шило запропоновано методику планувальної інтерферометрії для генеральних планів міст. Створений прилад – містобудівний планувальний інтерферометр.

У ті роки її було запропоновано авторами та передано директору Українського державного науково-дослідного інституту проектування міст «Діпромiсто» Ю. М. Білоконю. Нині цей інститут носить його ім'я.

Таким чином те, що ми можемо назвати поняттям «душа міста», транслює себе в матеріальному середовищі забудови за допомогою стоячих хвиль інтерференційного генезу. Стоячих хвиль. Але головна таємниця такого явища прихована за ще одним процесом, пов'язаним із геофізикою. Через те, що місто стоїть на Українському кристалічному щиті, створеному найдавнішими на Землі гранітопорфірами, вони мають свою неотектоонічну матрицю розривних структур. Яка «злегка» радіаційно фонить.

У людському організмі це викликає підсвідомий поклик організму деяких категорій людей (пневматиків) в ту частину електромагнітного спектру, яка знаходиться в зоні від рентгенівської ділянки до гамма-діапазону і далі. Чим вища духовність людини, тим більше вона генерує невелику дозу радіації. Мощі святих усі генерують слабку радіацію. Людина майбутнього буде

по відношенню до сучасної людини радіаційною. Небезпечною.

Як зазначають медики, потяг піднятися в цей діапазон у людях запрограмований генетично. Тобто це об'єктивна неминучість.

Так ось, головними точками душі міста будуть точки, що потрапляють своїми кільцевими структурами на перетин розривних (неотектонічних) структур в архейських граніто-парфірах.

У таких точках людина просто резонує на випромінювання такого роду, але, одночасно, вона резонує на частоти ядра Нашої Галактики. Він стає провідником між ядром Галактики та ядром Землі. І його організм трансмутує, тобто піднімає частоти свого функціонування. Або, інакше, реалізує свої ДНК коду, які спрямовані на повернення з полону у відповідні частки Всесвіту.

Приклад з історії. За часів існування Аратти – однієї з держав предків українців, існував особливий підхід до міст. Він ґрунтувався на 60-річному циклі обертання Сонця навколо Сіріуса. Сіріус та Сонце – бінарна зіркова система.

У структурі циклу було 4 підцикли – по 15 років. Цей цикл створював торсіони, якість яких і вважалися у системі тих знань душею міста. Сам собою 60-річний цикл був фракталом (зменшеною копією) іншого, більшого, галактичного циклу – теж торсіона. Але – з іншими якостями, оскільки форма галактики теж матеріалізований вихор – торсіон. Сонце зі своєю планетною системою летить у галактичному рукаві Оріона-Лебеда теж торсіоном, вихроподібним маршрутом, витягнутим у спіраль. І так далі. Місто Аратти планувальною структурою маніфестувало народження, життя і смерть нашого Всесвіту. У зв'язку з цим через 60 років жителі міста виходили за його стіни, маючи відповідний рівень трансмутації, а місто підпалювали [14; 15].

Цей феномен дослідив і описав у своїх монографіях відомий український археолог Ю. І. Шилов. Він додав наступне. Місто мало структуру, адекватну динамічній морфології Світобудови. Таким чином,

Всесвіт народжувався, жив, створював інші світи, а потім згоряв, руйнувався, вмирав. А населення її поселялося в інший Всесвіт, або його фрактал – місто, створене в іншому місті, задалегідь побудованому [15]. Цікаво відзначити, що сучасна наука тільки зараз почала досліджувати можливості існування Мультивсесвіту, у складі якого багато різних всесвітів. В Аратті це вже знали.

Рух з 60-річними циклами символізував переселення древніх слов'ян по всесвітам, яких у структурі Мультивсесвіту, як стверджують давні джерела, 622 трильйони. Усі вони – різних форм, розмірів та місій.

Про циклічні переселення предків на планети у різних зірок, з будівництвом міст, що мали морфологію душі світобудови, повідомляє й одна з найдавніших українських легенд, на яку вказує у своїх роботах М. Левченко, фольклорист, який жив у ХІХ столітті.

Розвиток міста постійно змінює його кількісні та якісні параметри під впливом постійних трансформацій астропланетарних проєкцій, змінюючих його генокод. Це поки в науковій літературі не розкрито.

Як не розкрито і головне – вплив астропланетарних циклів функціонування природних та соціальних процесів на Землі. Людина і людство живуть і працюють тільки у зв'язку з впливом таких циклів. Уклади життя, типи діяльності, світоглядні парадигми, архітектурно-містобудівні теорії та інші цивілізаційні явища є наслідком виведених із циклів енергоінформаційних рефлексій людей. Вони та їх архітектурно-містобудівні аспекти, у тому числі аспекти формоутворення як реакції абрисів об'єктів на довжини хвиль електромагнітного спектра при космопланетарних взаємодіях, повинні вивчатися та братися до уваги в числі перших, якщо потрібно розглядати все, що пов'язано з архітектурою та містобудуванням.

Більше того, у відкритому доступі ніде не торкнулися речей, що стосуються космопланетарного генези втілювання планувальних прийомів у структурі генерального плану міста.

Включно з тим, що ми називаємо концепцією Гіподама (Мілет, V ст. н. е.), яка генетично, спочатку, була пов'язана з регіональними сітками силового каркасу планети, що таким чином обмінюється з сітками космосу речовиною, енергією та інформацією, суворо відповідаючи їм; у зв'язку зі зміною астропланетарних процесів сітки потроху змінювалися. Торсіони трансформувалися. Параметри гіподамової структури завжди йшли за нею; тому в різні епохи сітки кварталів не однакові.

Те саме відбувалося і з радіально-кільцевою структурою генплану міста. Спочатку вона була виведена із законів фракталізації фізичного світу, що у давнину було оформлено у вигляді принципів унікального явища у людській культурі – Мандали. Вона є проєкцією багатовимірного фрактального гліфу Світобудови на поверхню тієї чи іншої ділянки території на основі спеціальних математичних побудов. Які нині виражені у задачі «делення цілого на частині».

Через війни гіподамова морфологічна структура, і радіально-кільцева структура у генеральних планах міст хоч і застосовувалися, і застосовуються досі, але вони, у зв'язку з втратою зв'язків із природними палетками диференціації природних процесів, створюють інші закономірності поляризації якостей середовища, стаючи руйнівниками природи. Тобто місто стало антагоністом, ворогом природного середовища. Розподіл його планувальної структури на частини (на квартал, житлову групу, мікрорайон та інші) не відповідає принципам розподілу територій із позиції забезпечення її стійкості. Людина у зв'язку з цим все більше втрачає зв'язок із законами природи, відокремлюючись від неї.

Є й інші джерела з цієї теми. Таким чином, космологія стародавніх епох суттєво випереджала космологію, створену сучасною наукою землян. Стародавні люди добре знали фізичний сенс понять «дух», «душа» та «генокод міста».

Про цикли Світобудови та їх вплив на планування міста як матеріального

вмістилища духу, душі та генокоду міста написано багато у ведичній літературі. А також в інших джерелах [10]

Спираючись на ці джерела, а також на досягнення сучасної науки, можна стверджувати, що «душа» – це енергоінформаційна матриця просторово-часового континууму, ще вмістює в середині себе торсіони, які не підчиняються законам простору та часу. Вона має лише частковий вплив на закони простору.

І, зрештою, «ГЕНОКОД ПЛАНУВАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ МІСТА», що є сітчастоподібною, фізично вираженою матрицею векторних траєкторій його планувальних рефлексій, виділених з іншої матриці – інтегральної сітчастоподібною матриці векторних смуг і ребер руху речовини, енергії, інформації, інформації, імпульсу та цілепокладання різного генезису. Які змінюються. Або, інакше кажучи – векторів сил різної природи, що утворюють у географічному просторі якийсь фізично виявлений гратчастоподібний каркас з рухів фізико-хімічних потоків та рухів енергоінформаційних потоків, які в рамках діапазону зору людей не видно, але на які реагує тіло будь-якої живої істоти. Де одиницею морфології містобудівного буття є не архітектурні метр, ритм, масштаб і пропорції між заповнювачами середовища, а універсальний вихор, що утворює первинні та вторинні енергоінформаційні потоки у просторі – першопричину прояву із себе фізичних форм-наслідків.

Для виявлення генокоду міста потрібно знати всю сукупність сил, видимих і не видимих, які діють на території, і навіть знати закони їх формоутворення та принципи вкладеності друг в друга.

По суті те, що має вважатися генокодом міста, є фізична матеріалізація процесів, що відбуваються на рівні душі та духу міста. Це – три грані одного процесу, у кожній з яких існують свої функції: на рівні духу міста – причини формування планувальних структур міста; на рівні душі міста – «одягання причини» у програму майбутніх матеріальних наслідків»; «генокод міста» - виконавча програма фізичного втілення

наслідків, що виникли у «душі міста». Дух, Душа і Генокод міста – це присутні в тому самому місці, вкладені один в одного, процеси, що функціонують у різних частотах: генокод – в межах електромагнітного спектра фізичного миру; душа міста – у частотах, що лежать у тій частині цього спектру, яка починається від гамма-променів та всіх інших, що йдуть у ліву частину шкали; «дух» міста виходить за шкалу фізичного світу, він над нею, але має емоційні зв'язки з душею міста у вигляді трансматеріальних імпульсів.

Ці уявлення узгоджуються з основами квантової теорії, а також квантової теорії петльової гравітації. Саме по смугах зв'язків і формуються в генплані міста найстійкіші елементи планування генерального плану міста (містобудівні вузли і планувальні зв'язки між ними), звані «містобудівним каркасом генерального плану міста».

Завдання дослідника, а потім і проектувальника, нанести матрицю (відповідні фізично-сітчастоподібні структури) таких зв'язків у системі «дух», «душа» та «генокод міста» на спеціальну карту, а потім дослідити містобудівні аспекти її морфології.

Таким чином, фізичний генокод планувальної структури міста існує у вигляді сітчастоподібної матриці векторних траєкторій його планувальних рефлексій, виділених з іншої матриці – інтегральної сітчастоподібної матриці векторних смуг та ребер руху речовини, енергії, інформації, імпульсу та цілепокладання різного генези. Або, інакше кажучи – векторів сил різної природи, що утворюють у географічному просторі якийсь фізично виявлений каркас з рухів фізико-хімічних потоків та рухів енергоінформаційних потоків, які в рамках діапазону зору людей не видно, але на які реагує тіло будь-якої живої істоти. І які реєструються приладами. Тут одиницею морфології містобудівного буття є не архітектурні метр, ритм, масштаб і пропорції між заповнювачами середовища, а вже згаданий вище універсальний вихор, що утворює первинні та вторинні енергоінформаційні потоки у просторі –

першопричину проявів фізичних форм – наслідків [6]. Для виявлення генокоду міста потрібно знати всю сукупність сил, видимих і невидимих, які діють території, і навіть знати закони їх формоутворення і вкладеності друг в друга.

Можна сказати і таким чином: за В. В. Воробйовим, всяка матеріальна форма у фізично проявленому світі на планеті (не тільки на Землі, але і на будь-якій іншій планеті) є структуроутворююча реакція речових та енергоінформаційних потоків на умовно динамічні (циклічні, оборотні) та еволюційні (незворотні) поєднання векторів сил, діючих у тих чи інших діапазонах просторово-часового континууму в заданих системах координат, частот і імпульсів, а також моделей прямих та зворотних зв'язків з будь-якими іншими заповнювачами їх внутрішнього та зовнішнього середовища, які, у свою чергу, є низхідні та (або) висхідні редуційні проєкції матриць з просторів з вище та (або) нижче числом вимірювань, що йде. Адитивний ефект впливу сил визначає фізичну, фізіологічну та психологічну трансформацію людей та будь-яких природних форм життя.

Як у біології генетичний код пов'язаний з уявленнями про момент його зародження та наступні етапи розподілу клітини на задану кількість частин, кількість яких підпорядкована цілком конкретним математичним рядам, і кожна її частина на основі енергоінформаційних (вихрових) механізмів отримує знання (завдання) для наступних етапів свого поділу, так і стосовно генерального плану міста існує точка закладки містобудівного генокоду.

Таким чином, пропонується новий погляд на початковий етап існування Катеринослава, етап, у структурі якого і було закладено генокод його планувальної матриці-палетки.

Це – центр астропроєкції фракталу галактичного торсіону. Тобто такі місця спочатку мають торсіони. Каркас визначається як центр осередку регіонального та планетарного силового каркасу Землі. Каркас є ієрархічний. Його центри осередків і вузли є місця тяжіння

фрактальних проекцій такого масштабного рівня.

Генокод нашого міста намагався розкрити один із найбільших архітекторів Дніпропетровська, Лауреат державної премії СРСР у галузі архітектури, начальник архітектурно-планувальної майстерні державного проектного інституту «Дніпроміданпроект», професор Є. Б. Яшунський [60]. Однак він «не зміг» (?) вирішити це завдання у потрібному обсязі та з необхідною методичною коректністю. Точніше, він не захотів це завершувати, хоча, будучи членом ордена розенкрейцерів, такими знаннями володів.

Багато з цих питань у 1994 році Є. Б. Яшунський, В. В. Воробйов і магістр ордену розенкрейцерів обговорювали, образно кажучи, «за зачиненими дверима». Але ми не могли тоді цей матеріал розмішувати у публікаціях. Чому? Тому ще в умовах СРСР багато напрямів знань блокувалися. Причина незавершеності його роботи в тому, що він не врахував процесів формоутворення структури генерального плану будь-якого міста, включаючи Дніпро, як у минулому, так і в майбутньому, пов'язаних не тільки із загальноприйнятими в теорії містобудування факторами та процесами, а й з космоекологічною модуляцією метрики території для містобудівних цілей. Зміни просторово-часових сіток зв'язків (сіток, що перетинаються за геоморфологічними законами зв'язкових структур з горизонтальних, вертикальних і похилих енергоінформаційних та фізичних обмінних смуг) у космопланетарних екологічних системах Землі, в першу чергу в екотопі (в його літосферній та орографічній компоненті), визначають діапазони прояви морфотем в архітектурі та містобудуванні, якщо до них підходити як до об'єктів, вписаних в геометрію морфологічної структури екосистеми, що поступово змінюється, і, одночасно, виявленим з них. Це і підводить до розуміння відповіді на запитання: на якій фізичній та енергоінформаційній матриці – носії розвиватимуться подальші трансформації

планувальної структури Дніпра? Це ж дозволяє переосмислити особливості формування його структури як у період становлення міста, так і в наступні етапи його існування. Включно з новим підходом до сприйняття міського простору [2].

На основі проведених у рамках заявленої теми досліджень відзначимо основні аспекти генетичної програми закладки та розвороту напрямів формоутворення планувальної структури Катеринослава як наслідку передстартових, стартових та післястартових морфоструктурних та морфоскульптурних формоутворень у рельєфі – екотопі, формоутворень в екоценозі, а також динамічних та еволюційних, коеволюційних та деволуційних трансформацій пов'язаного з ним енергоінформаційного силового каркасу території, який є визначальним, або, інакше, причинним у цьому процесі. Тобто у процесі слідства, у вигляді народження та ускладнення тих модуляцій в елементах сітки генплану Катеринослава, які нам відомі з його історії.

Катеринослав виник на перетині шести неотектонічних розломів-радіальних променів, якими течуть 5 річок, одна з яких (Дніпро) – домінуюча, дає два промені, тобто імітує як би дві річки, що точаться в різних напрямках – меридіональному і діагональному, з ПН-З на ПД-С. Зрештою, з позиції морфоструктурного розгляду території ми маємо 6 променів: три умовно, великих, і три – малих, що здаються не суттєвими. Ці розломи супроводжуються специфічною сіткою неотектонічних розривних структур, що продовжують дробити поверхні властивості екотопа, що став при цьому палаткою для початкового формоутворення Катеринослава, на модульні ареали різної якості. Шестипроменева структура галактичних астропроекцій абсолютно фрактальна галактичному торсіону. Вона мандальна за морфогенезом, і кожен промінь торсіона в диску мандали створює функціональні частоти відповідного типу.

Домінуючими при цьому, залишалися шість базових променів, пов'язаних з

руслами річок: три великі, три малі. Ці промені є елементами одного із семи ієрархічних рівнів сучасного ікосаедро-додекаедричного силового каркасу планети, у складі якого вбудований первинний каркас – гексагональний, у вигляді планетарного куба (так званого «куба Сатурна!»), який також має систему ієрархічних рівнів – підсистем, що масштабуються всередину один одного за принципом зменшення розмірів, але при дотриманні морфологічної подоби форми при заповненні їх внутрішнього простору.

Заповнення йде з поворотами кожного ієрархічного рівня за математичними законами, пов'язаним із подальшим дробленням міжпроменевих просторів за алгоритмом поділу цілого на частини, в яких первинним моментом є така морфологічна структура кристалічного силового каркасу планети, яка була станом на рік закладання міста. І його первинна форма у вигляді енергоінформаційного гексаедра (куба), але – особистого.

Гексаedr – це двовимірна проекція тривимірного куба, що стоїть на одній зі своїх вершин (техвимірна форма проектує себе на умовну площину (на рельєф місцевості). Або інакше – простір з великою кількістю вимірювань проектує себе в простір з меншим числом вимірювань.

У явищі, званому духом і душею міста, все пов'язане з процесом руху зі світу з малою кількістю вимірів у світі з великою кількістю вимірів. Тих, що йдуть до області не матеріального.

До тієї самої порожнечі, яка ніколи не народжувалася і ніколи не помре, яка не має розмірів і не має часу. Так її характеризують у давніх навчаннях. Тобто це – абсолютна свідомість, для якої фізичний світ – лише ілюзія. У математичній фізиці цей рух до порожнечі визначається за допомогою побудови особливої лінії, яка називається світовою лінією.

До силових ліній приурочені всі потоки руху речовини, енергії та інформації всіх наступних етапах історії Землі. Тобто силовий каркас проходив етапи трансформації у наступні види планетарних

кристалів інших геометричних форм. Кожна попередня форма продовжувала існувати у вигляді форми наступної.

Всі варіанти ускладнення морфології силових каркасів – матриць торсіонів – формують відповідні просторово-часові матриці дроблення місцевості на енергоінформаційні модулі, модулі поділу цілого на частини, які пов'язані з різними частотними діапазонами впливу екзогенних впливів на планету та її ендегенних відгуків на ці впливи, на перетині яких закладається містобудівний антропогенез. Геометрія модулів простору на частини не підпорядковується механічній однотипній фракталізації за принципом ляльки матрьошки. Тут кожен шар, на відміну від кільця на пні дерева, має не подібність до попереднього шару, а нову фармацію. І в цьому також велика особливість для пошуку формоутворення генетичного коду Катеринослава – Дніпропетровська – Дніпра.

Іншими словами, формоутворення кожного наступного кристала, що описує кристали попередні і одночасно нові, вписані в їх внутрішній простір на основі ієрархічних рядів тієї чи іншої метрики, яка підпорядковується виявленим числовим рядам. Це формоутворення по суті є проекцією каркасу простору вище вимірювання, що йде, в простір нижчого (нашого) вимірювання. Або, інакше, це осування (осьовий проєкційний зв'язок) світів. Точки осування розподілені по вузлах та центрах осередків інтегрального силового каркасу планети. Осування є базовим щодо частотних діапазонів просторів у структурі міста, які становлять його архітектурно-містобудівний генетичний код. У математиці така система вкладених один одного кристалів називається каскадним вписуванням. Вона спирається на ідею, суть якої в наступному: у будь-який правильний багатогранник можна вписати всі інші правильні багатогранники. Число всіляких каскадів з різних правильних багатогранників = 120. Останній правильний багатогранник – ікосаedr. Всі ці фігури пов'язані так чи інакше з просторами вище

вимірювань, що йдуть. І в нашому світі вони – лише проекції структур вище світів, що йдуть.

Ось як вербально описується ключовий елемент морфологічного коду міста. У його основі – тесеракт – чотиривимірний гіперкуб, аналог звичайного тривимірного куба у чотиривимірному просторі. Інші назви – 4-куб, тетракуб, восьмиосередок, октахор, гіперкуб. Він взаємодіє з правильним двадцятикумірником, або просто двадцятикумірником – одним із шести правильних багатоосередників у чотиривимірному просторі. Відомий також під іншими назвами: гекатонікосахор, гіпердодекаедр (оскільки є чотиривимірним аналогом додекаедра), додекаплекс (тобто «комплекс додекаедрів»), полідодекаедр. Двійний шестисотячейнику.

Проекція двадцятиосередника, що обертається, в тривимірний простір спільно з вище перерахованими геометричними формами силових проекцій визначає етапи зміни морфології планувальної структури генокоду міста як наслідку частотних причин – містобудівної душі та містобудівного духу міста.

Традиційно розглянуті у спеціальній літературі карти чергування генеральних планів міста на жаль нічого не пояснюють чого. Хоча автори статей та книг з такими генпланами у своїх текстах запевняють, що це і є справжня історія міста, насправді це не так.

Справжня історія – це історія поетапного інтегрування планувальних елементів у проекційні сітки структури, званої генокодом міста з вбудованими у нього Душою і Духом міста. Саме їхній електромагнітний та інші впливи на мозок городян викликає особливий тип ментальності населення, особливі ціннісні орієнтири, світоглядні парадигми, які в сукупності і прийнято вважати духом і душею міста. Чого насправді не відбувалося.

Генеральні плани Єкатериннослава-Дніпропетровська-Дніпра різних років містять місця невідповідності між фізичним слідством та енергоінформаційною

причиною, що транслює себе у генеральний план міста. Пояснення – у механізмі диференціації силового каркаса (каскадного проектування), описаного вище.

Головне протиріччя – між етапами трансформації генерального плану Катеринослава – Дніпропетровська – Дніпра з матрицею елементів розподілу території на елементи, створені каскадним проектуванням.

Дослідження генпланів більш давніх міст з цього погляду показали таке: у давні часи генеральний план міста чи сільського населеного місця містив структури, фрактально (кватерніонно), у просторі та часі, що відповідали циклам Всесвіту та його окремих верств. Кількість елементів – кілець (торсіонів) у генеральному плані населеного місця дорівнювали числу верств Світобудови.

Пропорції між ними також. Як і функції. Це ж стосувалося секторів генерального плану, а також його вузлів і зв'язків. Число опорних кілець у генеральному плані та його функції пов'язувалися з кількістю активованих у біополі людини тонких тіл. Люди, проживаючи вселенські цикли, то розгортали (активізували) свої біополя, то їх згортали. Або, інакше, то збільшували кількість зв'язків із простором та часом, то їх зменшували. Кожен цикл життя Всесвіту диктував свої геометричні зміни будівель і земельних ділянок для них, які підбиралися під частотний діапазон вселенського циклу та вселенського шару.

Таким чином, генеральний план населеного місця був фракталом накладання шаруватості світобудови на шаруватість планети, між якими існувала шаруватість людини. Вона резонувала і з тією, і з іншою шаруватістю довкола. Реалізація резонансного механізму здійснювалася через активацію ДНК людини. Генеральних планів поселень із семантикою, не пов'язаною з резонансними процесами, давні цивілізації не створювали. Сонастроювання забезпечувалася спеціальними моделями (укладами) життя людей. Сонастройки пов'язані з типами симетрії, в тому числі – мелодіями,

властивими циклу. Для цього моменту у свій час бала розроблена методика планіфонічного (музичного) аналізу та планіфонічного проектування міста (автори – В. В. Воробйов та О. С. Шило). Таким чином було розгадано фізичний сенс стародавнього виразу «архітектура – це застигла музика».

У стародавніх текстах легенд також говориться, що світ було створено музикою.

Перебуваючи у 1995 році у науковому відрядженні в одному з буддійських данців в Азії, В. В. Воробйов попросив перекласти ті частини текстів стародавніх манускриптів, які саме про це й говорили.

Тексти розповідали про те, як потрібно проектувати міста на основі проєкції музичних тем з ядра галактики, а також з інших ареалів, на конкретні точки на поверхні Землі.

Переклад із санскриту лами погодилися зробити тільки після того, як автор показав їм механізм створення планифонії (планувальної структури на основі музичних тем, спроектованих з неба, з певних джерел, на Землю) міста Дніпропетровська. Вони підтвердили правильність відходу.

Таким чином, геометрична конфігурація фізичного контуру будови чи решітки генерального плану населеного місця у нашому фізичному світі створювалася як проєкція форми, що існує у світі з вищою метрикою і модуляцією простору, а в тому своє чергу, як проєкція з ще більш високого світу, і так далі.

Виникає духовна вісь чи струна, вібрації якої у населеному місці пов'язані з усією етажеркою світів. Показники самої осі, а також її здатності поєднувати конкретну групу вище світів, що йдуть (просторів з усе більшим числом вимірювань), формуються конкретним типом геометричних змін у рельєфі.

Висновки

1. Історія трансформації генерального плану міста в контексті системи «дух – душа – генокод міста» не є історія зміни малюнка (морфології) цього генплану, оскільки такі малюнки історично вже створені як

відхилення від об'єктивного поділу фізичного поділу простору та часу на частини. Історією слід вважати етапи послідовного резонансного (на основі синусоїдальних гармонік, вкладених у багатомірні силові каркаси обмінних зв'язків, рядів) вписування морфоструктури решітки генплану в динаміку та еволюцію космопланетарних зв'язкових сіток – фрактальних астропроекцій галактичного та вищих рівнів на поверхні Землі, які відображають рефлексії системи «дух – душа – генокод міста».

2. Тривалість етапів прояву динаміки та еволюції нових планувальних структур в генеральному плану міста як наслідків зміни в системі «дух – душа – генокод міста» визначається тривалістю періодів матричних взаємодії кристалічного глобального силового каркасу планети зі своїм вростанням у сітки Всесвіту. Сітки простору і часу, утворені полями обертання, – головними визначниками морфопланувальних кодів структури генерального плану міста, точніше – головними визначниками нової якості тріади «дух – душа – генокод» міста. Змінилося кілька десятків ритмів, які визначатимуть підходи до формування будівель та морфології генерального плану Дніпра або іншого міста.

3. Кожному новому ритму та циклу системи «дух – душа – генокод міста» резонансно відповідатимуть нові геометричні абрисы в архітектурних та містобудівних об'єктах. Виникне і проблема поєднання архітектури та містобудування, пов'язаних з колишніми циклами, з архітектурою та містобудуванням, що розробляються та зводяться в частотних діапазонах нових циклів.

4. Кожен цикл – це свій набір частотних діапазонів фізичних процесів у просторі, якому відповідає резонансний набір рефлексій людини. Кожному виду рефлексій потрібна своя морфометрика та морфоритміка простору у заданому відрізьку часу. Вона обумовлена тим, що швидкість метаболізму та його фізіологічні

особливості в організмі людини у кожному циклі свої.

5. Відповідно до довжин і хвиль електромагнітного спектру, властивих даному, конкретному циклу системи «дух – душа – генокод міста», в мозку людини максимально активізуються ті зони, які відповідають цим довжинам хвиль простору, цим частотам електромагнітного поля. Викликаючи свої групи потреб. У тому числі потреб бачити свій набір геометричних характеристик будівель, споруд, елементів просторового середовища міста (розміри просторів та інші). Тобто кожен цикл системи «дух – душа – генокод міста» народжує схильність людини до своїх груп метра, ритму, симетрії, асиметрії, масштабу, пропорцій, траєкторій огляду (візуального споживання) середовища поглядом, та всі інші архітектурно-містобудівні особливості, що утворюють естетику середовища, міру заповненості середовища великими та малими об'єктами, міру розподілу великих та малих за розмірами об'єктів щодо секторів горизонту, котрим нульовим градусом відліку служить північна точка лінії магнітного меридіана, який, своєю чергою, теж поступово зміщується. Він пов'язаний із прецесійним

усуненням земної осі. Тобто напрямом на північ зміщується зі швидкістю один градус за 72 роки. У цьому зміщенні навіть одна десята градуса вже запускає зміни у людському організмі.

6. Кожен цикл народжує лише свої параметри перерахованих властивостей містобудівного простору. Навіть досягнення науково-технічного прогресу, які теж ап'орі впливають на вигляд архітектури та містобудування, з погляду вище названих змін простору в ритмополі – вторинні. Первинні – вібрації циклу та ритму.

7. Ритми та цикли системі «дух – душа – генокод міста» в зоні перших двох компонентів створюють програми полівалентності причини майбутнього, рансюю їх в матеріальній план генокода міста.

Таким чином, підходи до визначення стратегії розвитку генерального плану Дніпра мають виводитися із сукупного впливу нових факторів зміни простору та часу у новому ритмі, що створює нові уподобання до якостей містобудівного контенту. Це і буде тим завданням для архітекторів-науковців та архітекторів-практиків, яке належить вирішувати найближчим часом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адаменко А. А. Развитие человеческого общества в XXI столетии. К основам физического взаимодействия. Днепропетровск, 2010. Т. 1. С. 54–73.
2. Акимов А. Е., Шипов Г. И. Сознание, физика торсионных полей и торсионные технологии. Сознание и физическая реальность. Москва : Центр венчурных технологий, 1996. Т. 1, № 1–2. С. 34–56.
3. Антоненко Н. В. Периодическая система заков психики человека в системе Всеобщих Законов Мира и Общих законов человеческого общества : дис. докт. психол. наук. Москва, 2007. 44 с.
4. Бугаев А. Ф. Эниология человека. 2-е изд. испр.и доп. Москва : Профит Стайл; КСП+, 2006. 320 с.
5. Воробьев В. В. Город как эниокомплекс. *Эниология*. Одесса, 2001. С. 2–8.
6. Гончаров Н. Ф., Макаров В. А., Морозов В. С. Анализ проявлений силового каркаса Земли для изучения природных ресурсов. *Неоднородность ландшафтов и природопользование*. Москва : МФГО СССР, 1983. С. 121–133.
7. Воробьев В. В., Яцуба Я. С. Идеальные города: прорыв в прошлое или назад, в будущее. *Вестник ПДАБА*. 2009. № 10. С. 50–56.
8. Ковольов О. П. Географічний ландшафт : науковий, естетичний і феноменологічний аспекти. Харків : Екограф, 2005. 388 с.
9. К основам физического взаимодействия. *От атома к двуядерно-физическим субстанциям и живым волнам : матер. VIII междунар. науч.-практ. конф. международной академии биоэнерготехнологий*. 04–06 октября 2013 г. Научные труды действительных членов и членов-корреспондентов. Под науч. ред. проф. В. А.Ткаченко. Днепропетровск, 2013. 518 с.
10. Ланда В. Е., Глазкова Н. Н. Космические следы исчезнувших цивилизаций. Москва : Издат. дом «Муравей», 1999. 344 с.
11. Маслов Н. В. Периодическая система Общих Законов Познания/Постижения. Москва : Институт холодинамики, 2007. 179 с.

12. Окорокс В. Б. Метафизика эпохи трансцендентального мышления : специфика, сущность и тенденции развития. Днепропетровск : ДНУ, 2000. 270 с.
13. *Современное миропонимание : духовные аспекты развития культуры XXI столетия : матер. науч.-практ. конф.* Днепропетровск : Литограф, 2012. 54 с.
14. Шилов Ю. А. Мифы о «космических странниках» и календарная служба Европы – V–I тысячелетий до н.э. На рубежах познания Вселенной. *Историко-астрономические исследования*. XXIII. 1992. С. 251–300.
15. Шилов Ю. А. Праслов'янська Аратта. Київ : Аратта, 2003. 94 с.
16. Шипов Г. И. Теория физического вакуума. Москва : Фирма «НТ-Центр», 1993. 382 с.

REFERENCES

1. Adamenko A.A. *Razvitie chelovecheskogo obshchestva v XXI stoletii. K osnovam fizicheskogo vzaimodeistviia* [Development of Human Society in the 21st Century. On the Fundamentals of Physical Interaction]. Dnipropetrovsk, 2010, vol. 1, pp. 54–73. (in Russian).
2. Akimov A.E. and Shipov G.I. *Soznanie, fizika torsionnykh polei i torsionnye tekhnologii* [Consciousness, the Physics of Torsion Fields, and Torsion Technologies]. In: *Soznanie i fizicheskaiia real'nost'* [Consciousness and Physical Reality]. Moscow : Center for Venture Technologies, 1996, vol. 1, no. 1–2, pp. 34–56. (in Russian).
3. Antonenko N.V. *Periodicheskaia sistema zakonov psikhiki cheloveka v sisteme Vseobshchikh Zakonov Mira i Obshchikh zakonov chelovecheskogo obshchestva* [The Periodic System of Human Psyche Laws within the Universal Laws of the World and Human Society]. Doctoral Dissertation in Psychology. Moscow, 2007, 44 p. (in Russian).
4. Bugaev A.F. *Eniologiia cheloveka* [Human Eniology]. 2nd ed., rev. and ext. Moscow : Profit Style; KSP+, 2006, 320 p. (in Russian).
5. Vorobiov V.V. *Gorod kak eniokompleks* [The City as an Eniocomplex]. Odesa : Eniologiia Publ., 2001, pp. 2–8. (in Russian).
6. Goncharov N.F., Makarov V.A. and Morozov V.S. *Analiz proiavlenii silovogo karkasa Zemli dlia izucheniiia prirodnikh resursov* [Analysis of the Earth's Force Framework Manifestations for the Study of Natural Resources]. In: *Neodnorodnost' landshaftov i prirodopol'zovanie* [Landscape Heterogeneity and Natural Resource Use]. Moscow : MFGO USSR, 1983, pp. 121–133. (in Russian).
7. Vorobiov V.V. and Yatsuba Ya.S. *Ideal'nye goroda : proryv v proshloe ili nazad, v budushchee* [Ideal Cities : a Breakthrough into the Past or a Return to the Future]. *Visnyk PDABA* [Bulletin of PSACEA]. 2009, no. 10, pp. 50–56. (in Russian).
8. Kovolov O.P. *Heohrafichniy landshaft : naukovyi, estetychnyi i fenomenolohichniy aspekty* [Geographical Landscape : Scientific, Aesthetic, and Phenomenological Aspects]. Kharkiv : Ekohraf Publ., 2005, 388 p. (in Russian).
9. *K osnovam fizicheskogo vzaimodeistviia. Ot atoma k dviuiderno-fizicheskim substantsiiam i zhivym volnam : materialy VIII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii Mezhdunarodnoi akademii bioenergotekhnologii* [Toward the Fundamentals of Physical Interaction. From Atom to Dual-Nucleus Physical Substances and Living Waves: Proceedings of the 8th International Scientific-Practical Conference of the International Academy of Bioenergetic Technologies]. October 4–6, 2013, ed. by Prof. V.A. Tkachenko, Dnipro, 2013, 518 p. (in Russian).
10. Landa V.E. and Glazkova N.N. *Kosmicheskie sledy ischeznuvshikh tsivilizatsii* [Cosmic Traces of Lost Civilizations]. Moscow : Muravei Publishing House, 1999, 344 p. (in Russian).
11. Maslov N.V. *Periodicheskaia sistema Obshchikh Zakonov Poznaniia/Postizheniia* [The Periodic System of Universal Laws of Cognition/Comprehension]. Moscow : Institute of Holodynamics, 2007, 179 p. (in Russian).
12. Okoroks V.B. *Metafizika epokhi transzental'nogo myshleniia: spetsifika, sushchnost' i tendentsii razvitiia* [Metaphysics of the Era of Transcendental Thinking: Specifics, Essence, and Development Trends]. Dnipro : DNU Publ., 2000, 270 p. (in Russian).
13. *Sovremennoe miroponimanie : dukhovnye aspekty razvitiia kultury XXI stoletiiia* [Contemporary Worldview : Spiritual Aspects of Cultural Development in the 21st Century]. Proceedings of the Scientific-Practical Conference. Dnipropetrovsk : Litograf Publ., 2012, 54 p. (in Russian).
14. Shylov Yu.A. *Mify o "kosmicheskikh strannikakh" i kalendarnaya sluzhba Evropy – V–I tysiacheletii do n.e.* [Myths about “Cosmic Wanderers” and the Calendar Service of Europe – 5th–1st Millennia BC]. *Na rubezhakh poznaniia Vselennoi. Istoriko-astronomicheskie issledovaniia* [At the Frontiers of Universe Knowledge. Historical and Astronomical Studies]. Vol. XXIII, 1992, pp. 251–300. (in Russian).
15. Shylov Yu.A. *Praslovians'ka Aratta* [Proto-Slavic Aratta]. Kyiv : Aratta Publ., 2003, 94 p. (in Ukrainian).
16. Shipov G.I. *Teoriia fizicheskogo vakuuma* [Theory of Physical Vacuum]. Moscow : NT-Center, 1993, 382 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 23.08.2025.

УДК 624.042.4+624.014.2+624.04

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.241225.65.1210

АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬ ІЗ РІЗНИМИ КОНСТРУКТИВНИМИ СХЕМАМИ ДО ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ ВНАСЛІДОК РАКЕТНИХ УДАРІВ

ДАВИДОВ І. І.¹, канд. техн. наук, доц.,

ЧАБАН В. П.², канд. техн. наук, доц.,

КОВТУН-ГОРБАЧОВА Т. А.^{3,*}, канд. техн. наук, доц.,

КОВТУН К. А.⁴, аспір.

¹ Кафедра металевих, дерев'яних і пластмасових конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-62, e-mail: i.i.davydov@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7687-2241

² Кафедра металевих, дерев'яних і пластмасових конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-62, e-mail: v.p.chaban@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0217-5504

^{3*} Кафедра металевих, дерев'яних і пластмасових конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-62, e-mail: t.a.kovtun_horbachova@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0948-1299

⁴ Кафедра технології будівельного виробництва та геодезії, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (0563) 73-15-44, e-mail: t.a.kovtun_horbachova@ust.edu.ua

Анотація. Узагальнено результати інструментальних обстежень багатопверхових будівель цивільного призначення з каркасними та комбінованими конструктивними схемами, які пошкоджено внаслідок вибухового навантаження. Проведено чисельне моделювання процесу руйнування у квазістатичних та динамічних постановках. Сформульовано критерій поширення прогресуючого обвалення у вигляді порівняння вивільненої потенціальної енергії та енергії, необхідної для руйнування сусідніх елементів. Проведено кількісну оцінку енергетичного балансу для окремих ділянок конструкцій будівель з каркасними та комбінованими конструктивними схемами. **Мета статті** – аналіз межі поширення прогресуючого обвалення багатопверхових будівель цивільного призначення з каркасними та комбінованими конструктивними схемами після дії вибухового навантаження з урахуванням енергетичних характеристик системи. **Висновки.** Розроблено узагальнений алгоритм оцінки ризику поширення прогресуючого обвалення на основі енергетичного підходу. Встановлено зв'язок між типом конструктивної схеми та здатністю системи локалізувати руйнування. Будівлі зі змішаними схемами (вбудований каркас у поєднанні з несучими стінами) мають вищу енергопоглинаючу здатність за рахунок внутрішнього сухого тертя та багаточислової структури заповнення, що істотно знижує ризик повного прогресуючого обвалення.

Ключові слова: прогресуюче обвалення; енергетичний баланс; вибухове навантаження; багатопверхова будівля; чисельне моделювання; конструктивна схема; каркасна конструктивними схема; комбінована конструктивними схема; енергопоглинання

ANALYSIS OF THE STABILITY OF BUILDINGS WITH DIFFERENT STRUCTURAL SYSTEMS AGAINST PROGRESSIVE COLLAPSE DUE TO MISSILE STRIKES

DAVYDOV I.I.¹, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

CHABAN V.P.², Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

KOVTUN-HORBACHOVA T.A.^{3*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

KOVTUN K.A.⁴, Postgrad. Stud.

¹ Department of Metal, Wooden and Plastic Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-98-62, e-mail: i.i.davydov@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7687-2241

² Department of Metal, Wooden and Plastic Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-98-62, e-mail: v.p.chaban@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0217-5504

^{3*} Department of Metal, Wooden and Plastic Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-98-62, e-mail: t.a.kovtun_horbachova@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0948-1299

⁴ Department of Construction Technology and Geodesy, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (0563) 73-15-44, e-mail: t.a.kovtun_horbachova@ust.edu.ua

Abstract. In the mechanics of deformable solids and in the support of materials, as well as in the mechanics of composite materials, the main simple types of stress-strain state are used such as: pure tensile, pure compression and pure shear. In the case of pure tension (compression), in addition to longitudinal deformations (deformations along the direction of uniaxial stress), transverse deformations arise (deformations are normal to the load axis). With a pure shear, normal deformations to the shear planes are not taken into account. However, as shown in Part 1 and Part 2 of inelastic clean shear studies [10], in homogeneous materials with different resistance of tension and compression there are deformations normal to the displacement planes. In composite materials, such studies have not been conducted. The solution of tasks of this type in the mechanics of a deformable solid and in the support of materials, as well as in the mechanics of composite materials is not provided. **Goal.** On the basis of the methods and conditions of the mechanics of deformable solids and the resistance of materials, as well as earlier studies on inelastic clean shear [10], to determine the effect of linear continuous reinforcement of a composite on its deformation properties under pure shear. **Conclusions.** The stiffness of a composite at displacement (with a matrix having different plastic properties under tension and compression) beyond the elasticity of the matrix increases with increasing stiffness of the reinforcing elements even if the reinforcing elements are not capable of accepting the shearing forces. In studies of a stress-strain state in equations and systems of equations of equilibrium of effort it is necessary to take into account the deformation properties of materials both in tension and compression.

Keywords: *progressive collapse; energy balance; explosive loading; multi-storey building; numerical modeling; structural system; frame system; combined system; energy absorption*

Постановка проблеми. В умовах ракетних ударів по будівлях та спорудах України дуже актуальним є завдання уточнення аналізу стійкості будівель до екстремальних впливів, зокрема до прогресуючого обвалення. Такі руйнування, спричинені локальним пошкодженням одного елемента, можуть призвести до каскадного обвалення всієї споруди.

Національні стандарти [1–12] мають досить загальний характер, через що їх практичне застосування є обмеженим. По аналогії з Єврокодами в ДБН [1] методи зниження ризиків і запобігання прогресуючому обваленню залежать від класу наслідків (СС1-СС3). Необхідно провести оцінку загальної стійкості будівлі, щоб локальні пошкодження не призводили до повного руйнування та втрати цілісності будівлі загалом. Але граничні умови конструкцій не регламентуються.

У розділі 11 ДСТУ [11] наведено приклади розрахункових схем і типових деформацій об'єктів в залежності від місця розташування позапроектних дій, очагов ураження при позаштатних ситуаціях або військових діях.

Детальні рекомендації здебільшого стосуються лише висотних будівель з залізобетонними конструкціями [2]. Наприклад, для будівель з сталевим каркасом рекомендації вже відсутні.

Видання спеціалізованого ДСТУ 9294:2024 «Розрахунок будівель на стійкість до прогресуючого (непропорційного) обвалення» планується у 2025р.

Європейські норми [13–15] детальніше охоплюють дану проблему. При проектуванні конструкцій можуть бути застосовані як ймовірні сценарії ризиків (наприклад, вибухи, зіткнення), так і загальні вимоги до стійкості будівлі незалежно від типу загрози. Непропорційність аналізується на основі співвідношення між кінцевими й початковими збитками, незалежно від природи початкової події [14; 15]. Одним із основних підходів, що використовуються у Єврокодах [13–15], є проектування так званих ключових елементів. Це елементи конструкції, які здатні витримувати значні навантаження навіть у випадку втрати сусідніх частин. Окрім цього, передбачається застосування зв'язків між

різними елементами будівлі, а також резервування для забезпечення альтернативних шляхів навантаження, щоб уникнути повного обвалення у разі локальних пошкоджень.

Однак дотримання вказівок [13–15] може бути недостатнім для забезпечення стійкості конструкцій до прогресуючого обвалення. Наприклад, відсутні вимоги щодо певних типів процедур аналізу для споруд підвищеного ризику, таких як будівлі класу наслідків СС3. Незважаючи на те, що у [13–15] наведені вказівки щодо оцінки динамічних ударних навантажень або еквівалентного статичного навантаження для різних сценаріїв, комплексний метод для забезпечення врахування всіх відповідних динамічних ефектів відсутній. Умовне випадкове навантаження 34 кПа, рекомендоване для використання в конструкції ключових елементів, не завжди підходить для більшості випадкових проектних ситуацій.

У американських стандартах [16–24] наведені рекомендації щодо врахування динаміки, наводяться коефіцієнти динамічності, зміни у підходах до оцінки та обмеження величин, пластичних деформацій при врахуванні фізично нелінійної роботи. Подібно до Єврокодів у [19; 20] будівлі відносяться до різних категорій ризику на основі рівня розміщення будівлі та її функції чи критичності.

Вводяться спеціальні коефіцієнти, які коригують навантаження, що діють на конструкцію під час динамічних впливів, таких як вибухи, землетруси або інші раптові події. Ці коефіцієнти допомагають урахувати додаткові ефекти, що виникають під час швидкого розповсюдження руйнувань.

Стандарти містять оновлені методики для більш точного моделювання поведінки конструкції під час прогресуючого обвалення. Зокрема, підходи зосереджені на врахуванні фізично нелінійних процесів, що виникають у матеріалах конструкцій при великих деформаціях або під впливом складних навантажень.

Норми враховують можливість пластичних деформацій, які дозволяють конструкції залишатися стійкою навіть після локальних руйнувань. Однак встановлюються межі таких деформацій, щоб забезпечити збереження структурної цілісності.

Також виконується поєднання норм щодо прогресуючого обвалення та сейсмостійкого будівництва, дано вказівки щодо часу відмови для динамічного методу розрахунку. Використання сейсмостійких технологій сприяє зниженню ймовірності прогресуючого обвалення.

Динамічні методи розрахунку передбачають врахування того, скільки часу потрібно для повного або часткового обвалення елементів конструкції після виникнення критичних навантажень. Це допомагає у прогнозуванні прогресування обвалення та прийнятті необхідних заходів для його зупинки.

Стандарти детально розглядають причини початкової відмови елементів конструкції. Непропорційність розглядається через аналіз першопричин, таких як раптові локальні обвалення, помилки в проектуванні або непередбачені зовнішні чинники (землетруси, вибухи). Непропорційність оцінюється через причини початкової відмови [20; 21] шляхом аналізу сценаріїв видалення різних несучих елементів з конструктивної системи.

У [20] надаються рекомендації щодо врахування поєднання різних типів прогресуючого обвалення. За рекомендаціями [20] можливо незалежно від загроз застосовувати підхід обмеження прогресування початкового пошкодження в конструкціях шляхом розвитку ALP і резервування без врахування прямих причин початкового збою.

На відміну від Єврокодів у [20] надаються детальні вказівки щодо прийнятних методів аналізу, які можуть бути використані інженерами-проектувальниками при дослідженні прогресуючого обвалення. У [20] запропоновані лінійні статичні, нелінійні

статичні і нелінійні динамічні методи аналізу. Лінійний статичний аналіз застосовується до звичайних конструкцій, що не перевищують 10-ти поверхів. Для нерегулярних конструкцій понад 10 поверхів можна застосувати нелінійний динамічний аналіз. Після процесу аналізу розглядаються різні сценарії видалення конструктивних елементів.

Але досі зберігається багато невизначеностей у постановці завдання. Про це свідчить збільшення кількості публікацій на цю тему, протиріччя у існуючих нормативах, а також розробка нових стандартів.

Мета й завдання. У зв'язку з масовими руйнуваннями будівель в Україні внаслідок ракетних ударів 2022–2025 рр., авторами було проведено технічне обстеження пошкоджених споруд з різними конструктивними схемами. Це дозволило отримати дані щодо реальної поведінки конструкцій під дією екстремальних навантажень та здійснити порівняльний аналіз їх стійкості до прогресуючого обвалення.

Метою дослідження є виявлення закономірностей розвитку прогресуючого обвалення в будівлях з різними конструктивними схемами – рамно-зв'язковими, зв'язковими та змішаними каркасно-стіновими – та розробка інженерних підходів до прогнозування і

запобігання їх руйнуванню при надзвичайних ситуаціях. Для досягнення цієї мети ставляться наступні завдання. Виконати узагальнення результатів інструментального обстеження будівель з різними конструктивними схемами для виявлення закономірностей їх руйнування під дією ракетних ударів. Проаналізувати сценарії розвитку прогресуючого обвалення з урахуванням конфігурації несучої системи та характеру початкового пошкодження. Провести чисельне моделювання розвитку прогресуючого обвалення у квазістатичному та динамічному режимах з використанням програмних комплексів SCAD та LIRA-SAPR. Розробити алгоритм прогнозування поширення прогресуючого обвалення на основі енергетичного підходу – шляхом порівняння сумарної енергії руйнування з енергопоглинальною здатністю сусідніх конструктивних елементів.

Виклад матеріалу. Проведемо порівняння різних конструктивних схем багатопверхових будівель цивільного призначення, що належать до класу наслідків (відповідальності) СС2 згідно з ДБН [1]. Аналіз охоплює будівлі, розташовані в несейсмічній зоні, що дозволяє зосередитись на дії ударних та аварійних навантажень, зокрема прогресуючого обвалення внаслідок локальних пошкоджень.



Рис. 1. Схема будівлі № 1, розрахункова модель, типове перекриття

Будівля 1 (рис. 1) приклад будівель з повним залізобетонним каркасом. Будівля 1

збудована та введена в експлуатацію в 1980 рр., виконана за каркасною зв'язковою

схемою з сіткою колон 6×6 м та 3×6 м з повним залізобетонним каркасом згідно з типовою серією ІІІ-04. Просторова жорсткість каркаса забезпечується системною діафрагм жорсткості між колонами у двох напрямках, а також жорсткими дисками перекриттів зі збірних залізобетонних рядових і міжколонних зв'язкових плит. Колони жорстко защемлені у склянках залізобетонних фундаментів та шарнірно з'єднані зі збірними залізобетонними ригелями. Висоти 1-го – 8-го поверхів становлять 4.2 м, технічного 9-го поверху – 3.3 м. Колони основного каркасу мають перетин 0.4×0.4 м по серії ІІІ-04-2. Діафрагми жорсткості каркаса виконані для колон перетином 0.4×0.4 м по серії ІІІ-04-6. Ригелі перекриттів виконані збірними залізобетонними, в опалубці серії ІІІ-04-3 вип. 2. Застосовано плити перекриттів по серії ІІІ-04-4 випуск 1: рядові багатопустотні шириною 0.59 та 1.19 м, довжиною 5.76 м; зв'язкові – шириною 0.89 м та 1.19 м. Зовнішнє стінове огороження виконано зі стінових панелей серії ІІІ-04-5 – стінові панелі виконані легко бетонними та товщину 240 мм.

Внаслідок ракетного удару російської федерації (попадання ракети в рівні верхнього поверху) обвалилася частина плит перекриттів, ригелів каркасу та колон; порушено структуру зв'язкового каркасу; відбулось руйнування стінових панелей та масові ослаблення та деформації вузлів кріплення стінових панелей. Існує небезпека подальшого обвалення конструкцій будівлі, технічний стан будівлі – аварійний (категорія «4») [11].

Класифікувати характер наявного та потенційного обвалення несучих конструкцій будівлі можна як обвалення через нестабільність (Instability collapse) з ознаками змішаного типу (Mixed-Type Failure) [25]. Чисельне моделювання проводилось із урахуванням дії вибухового навантаження, еквівалентного потужності ракети (сила вибуху – 1 000 кН, тривалість імпульсу вибухової хвилі – 0.01–0.05 с, імпульс вибуху – 0.267 кН·с). Аналіз виконано з використанням квазістатичних та

динамічних методів розрахунку, що дозволило змодельовати різні сценарії поширення прогресуючого обвалення. Квазістатичний метод Pull-down (імітується дія залишкових зусиль від зруйнованих елементів – обвалених перекриттів, які передаються вниз через вузли) показав, що найбільш вразливими є середні колони, які сприймають додаткові зусилля. Критичне навантаження на вузол (перекриття + ригель): 140–180 кН, на колону 450–600 кН. При прикладенні еквівалентного навантаження від двох поверхів – втрата несучої здатності колон нижніх поверхів розвивається вертикальний механізм прогресуючого обвалення типу «Domino Effect».

Квазістатичний метод Push-down (поступове прикладення вертикального навантаження, що моделює зростаючу дію маси верхніх конструкцій) показав, що межа руйнування досягається при навантаженні, що перевищує 180–200 % від власного статичного зусилля в ригелях: 250–300 кН, при коефіцієнті динамічності 2 – втрата однієї середньої колони на 1-му та 2-му поверхах спричиняє ланцюгове обвалення, при навантаженні 1.5–1.7 критичного і це приводить до повномасштабного обвалення.

Квазістатичне миттєве видалення елементів (моделюється миттєве зникнення несучих елементів з подальшим перерозподілом зусиль) показало, що втрата однієї центральної колони приведе до локального обвалення ригеля й плити.

Втрата двох колон в одному ряду приведе до горизонтального поширення руйнування по ригелях і приводить до подальшого руйнування суміжних колон. Втрата трьох колон (кутових або по діагоналі) приведе до повного прогресуючого обвалення в межах блоку.

Динамічне моделювання (використано змінне навантаження, що зростає від нуля до повного значення в заданий час: центральна колона – $t_1 = 0.05$ с, дві колони в одному ряду – $t_1 = 0.03$ с, три колони в кутовому блоці – $t_1 = 0.02$ с) показало, що ригелі перевантажуються у 2–3 рази, можливе часткове обвалення, руйнування ригелів

спричиняє обвалення перекриттів і суміжних колон. Відбувається передача імпульсу вгору та вбік, реалізується ефект Domino.

Будівля № 2 представляє конструктивні схеми з неповним вбудованим залізобетонним каркасом, перекриттями по збірним залізобетонним плитам та зовнішніми цегляними несучими стінами

(рис. 2) 1960-х рр. Узли примикання прогонів до колон – шарнірні. Узли обпирання колон на фундаменти – рамні. Просторова жорсткість будівлі забезпечується наявністю повздовжніх та поперечних зовнішніх стін, жорсткими вузлами примикання колон до фундаментів та жорсткими дисками перекриттів зі збірних залізобетонних плит.



Рис. 2. Схема будівлі № 2, пошкодження плит перекриття, схеми поперечників крайніх частин та середньої

Внаслідок ракетного удару російської федерації (попадання ракети в рівні покриття середньої частини) зруйновані конструкції покриття та плити перекриття верхнього поверху, виявлено значні пошкодження плит перекриттів під зонами обвалення. Існує загроза подальшого обвалення частини плит перекриття. Технічний стан будівлі – стан не придатний для нормальної експлуатації (категорія стану «3») [11]. Можна класифікувати характер наявного та потенційного обвалення несучих конструкцій будівлі як згорання блискавки (Zipper Collapse) [25] – руйнування конструкцій покриття відбулось у послідовному повздовжньому напрямку. Супутні механізми: вертикальне послідовне руйнування перекриттів (Pancake Collapse) та обвалення через втрату стійкості окремих конструкцій (Instability Collapse). Pulldown (імітація дії обвалених елементів);

навантаження: зусилля в одному вузлі: 80–120 кН, прогини балок і плит: 35–60 мм, коефіцієнти використання міцності: 0.8–1.1. Характерний розвиток Zipper Collapse або Mixed-type failure [25] – руйнування поширюється на суміжні вузли та елементи.

Pushdown (імітація втрати несучої здатності від маси верхніх конструкцій); навантаження: зусилля в одному вузлі: 60–90 кН, загальне навантаження на поверх: 900–1100 кН, прогини балок і плит: 25–45 мм, коефіцієнт використання міцності 0.75. Результат: Pancake Collapse – поступове послідовне руйнування перекриттів зверху вниз.

Метод миттєвого видалення (миттєве видалення одного або кількох елементів конструкції з моделюванням навантажень у вузлах, до яких вони були під'єднані зі зворотним знаком, з урахуванням коефіцієнта динамічності $k = 2$);

навантаження: зусилля в одному вузлі: 150–200 кН (ударного типу), прогини балок і плит: 65–85 мм, коефіцієнти використання: 1.1–1.4.

Результат: розвиток Instability Collapse або Domino Collapse – руйнування поширюється через втрату рівноваги всієї підсистеми.

Динамічне навантаження: пікове зусилля в одному вузлі: 180–240 кН, прогини балок і плит: 70–100 мм, коефіцієнти використання: 1.25–1.6, час наростання навантаження: $t_1 = 0.2-0.4$ с. Результат: Mixed-type failure – швидка передача руйнування через динамічну нестійкість та імпульсну дію.



Рис. 3. Схема будівлі № 3, схеми поперечників крайніх частин та середньої, фрагмент каркаса будівлі, пошкодження перегородок

Будівля № 3 також належить до категорії конструктивних схем з неповним вбудованим залізобетонним каркасом (рис. 3) 1950-х рр. Основною відмінністю від будівлі № 2 є конструкція перекриттів. Перекриття виконані за схемою поздовжніх залізобетонних балок, які жорстко з'єднані з колонами вбудованого каркасу. Це забезпечує просторову жорсткість та сумісну роботу елементів каркасу. Поперечні балки виконані збірними залізобетонними елементами таврового перерізу. Вони спираються на поздовжні балки й формують другий рівень розподілу навантаження. На поперечні балки спираються балки-прогони заповнення –

збірні залізобетонні елементи таврового перерізу, що забезпечують спирання шлакобетонних дрібноштучних вкладок. Внаслідок ракетного удару російської федерації (попадання ракети в рівні покриття середньої частини) зруйновані конструкції покриття та масово зруйновані перегородки. Технічний стан несучих конструкцій перекриттів, стін, колон та балок вбудованого каркаса будівлі – задовільний (категорія стану «2») [11]. Руйнування конструкцій покриття відбулось у послідовному повздовжньому напрямку і це можна класифікувати як локальний «zipper collapse» [25] даху. Проте процес не пішов далі на основні конструкції несучих

стін, вбудованого каркасу та перекриттів. Це свідчить про високу стійкість будівлі до дії імпульсного навантаження, що пов'язано з особливостями роботи конструктивної схеми. У перекриттях із використанням шлакобетонних дрібноштучних вкладок по балках заповнення формується контактна система елементів без зв'язувального розчину. Це створює умови для виникнення сухого тертя – формує додатковий демпфуючий механізм, що особливо ефективний при короткочасних динамічних діях – таких як вибух чи удар [26–28].

Також перегородки частково взяли участь у передачі горизонтальних навантажень – тимчасово працювали як елементи жорсткості: передаючи частину горизонтального імпульсу до основних несучих елементів несучих стін та вбудованого каркасу; обмежуючи переміщення суміжних конструкцій; поглинаючи частину енергії руйнування.

Для оцінки граничної межі поширення прогресуючого обвалення у дослідженнях [19; 20; 23–25] пропонується виконати аналіз енергетичного балансу.

У [19; 23; 24] пояснюється, як енергія від початкового обвалення може бути використана для оцінки ймовірності переходу обвалення на інші частини конструкції.

У [25] надано обґрунтування, що розвиток обвалення залежить від здатності структури поглинати або передавати енергію.

Єврокод EN 1991-1-7:2006 (ДСТУ EN 1991-1-7:2011) також вказує на можливість використання альтернативного шляху та оцінки динамічного відкликання для врахування прогресуючого обвалення.

Таким чином, можна сформулювати умову енергетичного підходу для того щоб визначити як буде поширюватись прогресуюче обвалення [19; 20; 23–25]:

$$E_{\text{вивільнена}} \geq E_{\text{необхідна}}. \quad (1)$$

$E_{\text{вивільнена}}$ – це потенційна енергія, яку мали елементи до моменту обвалення. Розрахунок енергії, що вивільняється

(наприклад, при обваленні плит перекриття):

$$E_{\text{вивільнена}} = \sum m_i \times g \times h_i, \quad (2)$$

де: m_i – маса i -тої плити або елемента, g – прискорення вільного падіння, h_i – висота, з якої падає елемент (висота поверху), враховується кінетичний компонент (енергія удару по нижнім конструкціям).

Для оцінки енергії, потрібної для ініціації руйнування наступної ділянки, або сусіднього блоку визначаємо енергію руйнування ригелів та колон наступної ділянки, яку здатні поглинати вузли, енергію дисипації, пов'язану з пластичними деформаціями та тріщиноутворенням:

$$E_{\text{необхідна}} = \sum (0.5 \times F_{\text{кри}} \times \delta_i), \quad (3)$$

де: $F_{\text{кри}}$ – граничне зусилля, яке необхідно прикласти до елемента для його руйнування, δ_i – відповідна деформація або прогин до зламу.

Для будівлі № 1 енергія падіння плит та ригелів складає 210 МДж (сумарна маса конструкцій, що обвалилась 1130.4 т).

Результати оцінки гравітаційної потенціальної енергії при обваленні 8-поверхової трипролітної залізобетонної рами (800 т маси): потенціальна енергія 1186.6 МДж. Таким чином, повна енергія, потрібна для поширення обвалення набагато більше ніж загальна енергія при фактичному обваленні конструкцій. Навіть при врахуванні динамічних ефектів (імпульс, втрату стабільності, інерційні сили при падінні), можна оцінити додатково коефіцієнт динамічності $k = 1.5$ – 2.0 . Це пояснює чому не відбулося подальшого поширення прогресуючого обвалення на весь каркас будівлі № 1 в межах деформаційного блоку та на інший деформаційний блок.

Для залізобетонного зв'язкового каркаса будівлі № 1 для ініціації прогресуючого обвалення потрібне локальне руйнування одного або декількох ключових конструктивних елементів – центральна або крайня колона у поєднанні з ригелем.

Мінімум для запуску обвалення зв'язкового каркаса – зона первинного

ураження може виглядати наступним чином – площа руйнування 6×6 м (верхні поверхи) – 6×12 м (середні поверхи).

Також це може бути втрата 1–2 колон, які підтримують 1 ригель та 2–3 плити перекриття. Поверховий об'єм маси, що втрачає опору буде складати 20–40 т.

У випадку втрати центральної колони на рівні нижнього або середнього поверху буде найвищий ризик прогресуючого обвалення.

Проаналізуємо сценарії розповсюдження обвалення – межа переходу до повного прогресуючого обвалення.

Повне прогресуюче обвалення відбувається при втраті 3-х і більше колон у ряду або кутового вузла (колона + 2 ригелі).

При втраті 4-х колон в межах площі 6×12 м – відбувається поширення прогресуючого обвалення на всю висоту каркаса.

Залізобетонні ригелі, що з'єднують ≥ 3 -х колон, при втраті середньої – не в змозі утримати навантаження від вищого поверху – викликає горизонтальну прогресію руйнування.

У будівлі № 2 потенційна енергія обвалення згідно (2) складає 38.5 МДж.

Приймаємо, що 1 м² перекриття (плита + балки) може поглинути 25–30 кДж до повного руйнування. Тоді загальна енергія поглинання згідно (3) складає 14.28 МДж.

Прогноз обвалення – умова прогресуючого обвалення (1) виконується: 38.45 МДж > 14.28 МДж.

Для ініціації прогресуючого обвалення потрібне локальне руйнування одного або декількох ключових конструктивних елементів – колони, балки, плити.

Мінімум для запуску обвалення будівлі № 2 зі змішаною конструктивною схемою: руйнування 3-х колон у ряд (однакова вісь) або більше 6-х у площині будівлі; руйнування та падіння плит у 2 рівнях поспіль; руйнування конструкцій одного прольоту (в межах шагу колон) – може спричинити обвалення до 50 % будівлі, так як енергія поширення не стримується – зв'язки відсутні.

Для будівлі № 3 енергія падіння кроквяних конструкцій складає до 10 МДж.

Результати оцінки гравітаційної потенціальної енергії при руйнуванні умовного поперечника будівлі 150 МДж.

Повна енергія, потрібна для поширення обвалення набагато більше ніж загальна енергія обвалення навіть при врахуванні динамічних ефектів.

Висновки

Виконане узагальнення на основі даних інструментального обстеження будівель з різними конструктивними схемами та численного моделювання сценарії розвитку прогресуючого обвалення у квазістатичних та в динамічному режимах. Квазістатичні методи аналізу прогресуючого обвалення та динамічне моделювання доцільно використовувати в комплексі від простої оцінки до детального моделювання. Квазістатичні методи Push-down дозволяють виконати оцінку граничної несучої здатності конструкції – скільки навантаження може витримати конструкція до обвалення, но не враховує динаміки руйнування. Тому що, при зростанні навантаження конструкції «адаптуються».

Квазістатичне миттєве видалення елементів – моделює раптом втрачені опори через вибух) показує, як система реагує на раптовий перерозподіл зусиль – локальне обвалення та ланцюгових ефектів. Неможливо врахувати швидкість передачі навантажень.

Квазістатичні методи Push-down дозволяють виконати первинну оцінку від втрати колон, але все ще не моделює повноцінну динаміку.

Динамічне моделювання (із наростанням навантаження) дозволяє виконати більш реалістичну оцінку розвитку прогресуючого обвалення у просторі та часі, але складніше у реалізації, потребує більш точних вхідних даних.

Наведено алгоритм аналізу критичних сценаріїв можливого поширення прогресуючих обвалень для оцінки ризиків в умовах надзвичайних ситуацій.

Розроблено, на основі існуючих досліджень, алгоритм прогнозу можливого поширення прогресуючих обвалень будівель з різними конструктивними схемами на основі енергетичного балансу системи (сумарна енергія «руйнування» в порівнянні з поглинальною здатністю сусідніх елементів).

Каркасна будівля з більш сучасною конструктивною схемою показала гірші результати на поширення прогресуючого обвалення при впливах від ракетних ударів в порівнянні з будівлями зі змішаною конструктивною схемою, що включає несучі стіни та вбудований каркас.

Конструктивна схема будівлі з більш «старою» змішаною схемою з дрібнорозмірними елементами заповнення

перекриттів показала кращі результати у разі впливу ракетних ударів за рахунок додаткового сухого тертя між елементами як амортизатора.

Обсяг обвалення залежить не тільки від маси, але й від: типу конструктивної схеми, жорсткості вузлів, присутності зв'язків та їх типу, розподілу навантажень.

Енергетичний підхід дозволяє: порівнювати різні сценарії поширення прогресуючого обвалення; робити кількісну оцінку потенційної небезпеки; визначити конструктивні елементи, від яких залежить стійкість та межа поширення руйнування (наприклад, руйнування до 2 колон та одного ригеля зазвичай не викликає повного обвалення, якщо структура здатна поглинути енергію).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.1.2-14-2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. Київ : Мінрегіон України, 2018. 36 с.
2. ДБН В.2.2-41:2019. Висотні будівлі. Основні положення. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2019. 50 с.
3. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. Київ : Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, 2023. 119 с.
4. ДБН В.2.6-98:2009. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.
5. ДБН В.2.6-162:2010. Кам'яні та армокам'яні конструкції. Основні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 97 с.
6. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Київ : Мінрегіон України, 2014. 199 с.
7. ДБН В.2.1-10:2018. Основи та фундаменти. Основні положення проектування. Київ : Мінрегіонбуд України, 2018. 36 с.
8. ДБН В.1.1-12:2014 (із Зміною №1 від 01.05.2019). Будівництво у сейсмічних районах України. Київ : Мінрегіонбуд України, 2014. 110 с.
9. Наказ від 06.08.2022 № 144 Міністерства розвитку громад та територій України «Про затвердження Методики проведення обстеження та оформлення його результатів».
10. ДСТУ Б В.2.6-210:2016. Оцінка технічного стану сталевих будівельних конструкцій, що експлуатуються. Київ : Мінрегіон України, 2017. 80 с.
11. ДСТУ 9273:2024. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024. 74 с.
12. ДСТУ Б В.3.1-2:2016. Ремонт і підсилення несучих і огорожувальних будівельних конструкцій та основ будівель та споруд. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 67 с.
13. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1–2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1993-1-2:2005, IDT). Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 106 с.
14. ДСТУ-Н Б EN 1991-1-2:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1–2. Загальні дії. Дії на конструкції під час пожежі (EN 1991-1-2:2002, IDT). Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 80 с.
15. EN 1991-1-7. Eurocode 1: Actions on structures – Part 4 : Part 1-7 : General actions – Accidental actions : EN 1991-1. Brussels : Management Centre, 2006. 69 p. (European Standard).
16. ANSI/AISC 360-16. An American National Standard. Specification for Structural Steel Buildings : American Institute of Steel Construction, 2016. 680 p.
17. Steel construction. Thirteenth edition : American Institute of Steel Construction, 2005. 2181 p.
18. Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings. NIST, February 2007. DOI:10.6028/NIST.IR.7396 Corpus ID: 114475501.
19. UFC 4-023-03 (Including Change 4, 10 June 2024). Unified facilities criteria. Design of buildings to resist

progressive collapse. (Department of defense USA).

20. General Service Administration Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance Revision 1, January 28, 2016. URL: <https://www.gsa.gov/real-estate/design-and-construction/engineering-and-architecture/security-engineering>.

21. American Society of Civil Engineers ASCE 76-23 : Standard for mitigation of disproportionate collapse potential in buildings and other structures ASCE Library (2023), URL: <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784415931>

22. FEMA P-751. Design Guide for Improving School Safety in Earthquakes, Floods and High Winds. 2009. URL: https://www.wbdg.org/FFC/DHS/ARCHIVES/FEMA_P751_NEHRP_Design_Examples_2009.pdf

23. UFC 4-023-07. Design to Resist the Effects of Accidental Explosions. Department of defense USA. 2008. URL: <https://www.wbdg.org/ffc/dod/unified-facilities-criteria-ufc/ufc-3-340-02>

24. UFC 3-340-01. Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects. Department of defense USA. 2002. URL: <https://www.wbdg.org/ffc/dod/unified-facilities-criteria-ufc/ufc-3-340-01>

25. Starossek U. Progressive collapse of structures (Second edition). ICE Publishing, Westminster, London, 2017. DOI: 10.1680/jpcos.61682.

26. Давыдов И. И. Особенности расчета и защиты строительных конструкций от прогрессирующего обрушения. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2010. № 11. С. 38–46.

27. Радкевич А. В., Давыдов И. И., Чабан В. П., Ковтун К. А. Аналіз методів розрахунку на прогресуюче обвалення одноповерхових каркасних виробничих будівель та пошук можливостей підвищення точності розрахунків. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 1 (019). С. 122–129. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.270224.122.1032.

28. Mohamad Taklas, Moussa Leblouba, Samer Barakat, Ahmed Fageeri & Firass Mohamad. Concrete-to-concrete shear friction behavior under cyclic loading : experimental investigation. 2022. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13530-5> www.nature.com/scientificreports

REFERENCES

1. *DBN V.1.2-14:2018. Zahal'ni pryntsyty zabezpechennya nadiynosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel' i sporud* [DBN B.1.2-14:2018. General principles for ensuring the reliability and structural safety of buildings and structures]. Kyiv : Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine, 2018, 36 p. (in Ukrainian).

2. *DBN V.2.2-41:2019. Vysotni budivli. Osnovni polozhennya* [DBN B.2.2-41:2019. High-rise buildings. Basic provisions]. Kyiv : Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine, 2019, 50 p. (in Ukrainian).

3. *DBNV.2.2-5:2023. Zakhysni sporudy tsyvil'noho zakhystu* [DBN B.2.2-5:2023. Protective structures of civil protection]. Kyiv : Ministry for Communities, Territories and Infrastructure Development of Ukraine, 2023, 119 p. (in Ukrainian).

4. *DBN V.2.6-98:2009. Betonni ta zalizobetonni konstruktsiyi. Osnovni polozhennya* [DBN B.2.6-98:2009. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2011, 71 p. (in Ukrainian).

5. *DBN V.2.6-162:2010. Kam'yani ta armokam'yani konstruktsiyi. Osnovni polozhennya* [DBN B.2.6-162:2010. Masonry and reinforced masonry structures. Basic provisions]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2011, 97 p. (in Ukrainian).

6. *DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsiyi. Normy proektuvannya* [DBN B.2.6-198:2014. Steel structures. Design standards]. Kyiv : Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine, 2014, 199 p. (in Ukrainian).

7. *DBN V.2.1-10:2018. Osnovy ta fundamenti. Osnovni polozhennya proektuvannya* [DBN B.2.1-10:2018. Foundations and substructures. Basic design principles]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2018, 36 p. (in Ukrainian).

8. *DBN V.1.1-12:2014 (iz Zminoyu №1 vid 01.05.2019r.). Budivnytstvo u seysmichnykh rayonakh Ukrayiny* [DBN B.1.1-12:2014 (with Amendment No. 1 from 01.05.2019). Construction in seismic regions of Ukraine]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2014, 110 p. (in Ukrainian).

9. *Nakaz vid 06.08.2022 № 144 Ministerstva rozvytku hromad ta terytoriy Ukrayiny "Pro zatverdzhennya Metodyky provedennya obstezhennya ta oformlennya yoho rezul'tativ"* [Order No. 144 dated 06.08.2022 of the Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine "On approval of the Methodology for conducting surveys and documenting their results"]. (in Ukrainian).

10. *DSTU B V.2.6-210:2016. Otsinka tekhnichnoho stanu stalevykh budivel'nykh konstruktsiy, shcho ekspluatuyut'sya* [DSTU B V.2.6-210:2016. Evaluation of the technical condition of in-service steel building structures]. Kyiv : Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine, 2017, 80 p. (in Ukrainian).

11. *DSTU 9273:2024. Nastanova shchodo obstezhennya budivel' i sporud dlya vyznachennya ta otsinyuvannya yikhnoho tekhnichnoho stanu. Mekhanichnyy onip ta styykist'* [DSTU 9273:2024. Guidelines for the inspection of buildings and structures for the determination and assessment of their technical condition. Mechanical integrity and

stability]. Kyiv : SE “UkrNDNC”, 2024, 74 p. (in Ukrainian).

12. DSTU B V.3.1-2:2016. *Remont i pidsylennya nesuchykh i ohorodzhuval'nykh budivel'nykh konstruksiy ta osnov budivel' ta sporud* [DSTU B V.3.1-2:2016. Repair and strengthening of load-bearing and enclosing building structures and foundations of buildings and structures]. Kyiv : SE “UkrNDNC”, 2017, 67 p. (in Ukrainian).

13. DSTU-N B EN 1993-1-2:2010. *Yevrokod 3. Proektuvannya stalevykh konstruksiy. Chastyna 1-2. Zahal'ni polozhennya. Rozrakhunok konstruksiy na vohnestiykist' (EN 1993-1-2:2005, IDT)* [DSTU-N B EN 1993-1-2:2010. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-2. General rules. Structural fire design (EN 1993-1-2:2005, IDT)]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010, 106 p. (in Ukrainian).

14. DSTU-N B EN 1991-1-2:2010. *Yevrokod 1. Diyi na konstruksiyi. Chastyna 1-2. Zahal'ni diyi. Diyi na konstruksiyi pid chas pozhezhi (EN 1991-1-2:2002, IDT)* [DSTU-N B EN 1991-1-2:2010. Eurocode 1. Actions on structures. Part 1-2. General actions. Actions on structures exposed to fire (EN 1991-1-2:2002, IDT)]. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010, 80 p. (in Ukrainian).

15. EN 1991-1-7. Eurocode 1 : Actions on structures – Part 4 : Part 1-7 : General actions – Accidental actions : EN 1991-1. Brussels : Management Centre, 2006, 69 p. (European Standart).

16. ANSI/AISC 360-16. An American National Standard. Specification for Structural Steel Buildings : American Institute of Steel Construction, 2016, 680 p.

17. Steel construction. Thirteenth edition : American Institute of Steel Construction, 2005, 2181 p.

18. Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings. NIST, February 2007. DOI:10.6028/NIST.IR.7396 Corpus ID: 114475501.

19. UFC 4-023-03 (Including Change 4, 10 June 2024). Unified facilities criteria. Design of buildings to resist progressive collapse. (Department of defense USA).

20. General Service Administration Alternate path analysis & design guidelines for progressive collapse resistance (2016) URL: <https://www.gsa.gov/real-estate/design-and-construction/engineering-and-architecture/security-engineering>. Revision 1, January 28, 2016.

21. American Society of Civil Engineers ASCE 76-23 : Standard for mitigation of disproportionate collapse potential in buildings and other structures ASCE Library (2023), URL: <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784415931>

22. FEMA P-751. Design Guide for Improving School Safety in Earthquakes, Floods and High Winds. 2009. URL: https://www.wbdg.org/FFC/DHS/ARCHIVES/FEMA_P751_NEHRP_Design_Examples_2009.pdf

23. UFC 4-023-07. Design to Resist the Effects of Accidental Explosions. Department of defense USA, 2008. URL: <https://www.wbdg.org/ffc/dod/unified-facilities-criteria-ufc/ufc-3-340-02>

24. UFC 3-340-01. Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects. Department of defense USA, 2002. URL: <https://www.wbdg.org/ffc/dod/unified-facilities-criteria-ufc/ufc-3-340-01>

25. Starossek U. Progressive collapse of structures (Second edition), ICE Publishing, Westminster, London, 2017. DOI: 10.1680/pcos.61682.

26. Davydov I.I. *Osobennosty rascheta y zashchyty stroytel'nykh konstruksiy ot prohressyruyushcheho obrusheniya* [Features of the design and protection of building structures against progressive collapse]. *Visnyk Prydniprovskoyi Derzhavnoyi Akademiyi Budivnytstva ta Arkhitektury* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture], 2010, no. 11, pp. 38–46. (in Russian).

27. Radkevych A.V., Davydov I.I., Chaban V.P. and Kovtun K.A. *Analiz metodiv rozrakhunku na prohresyruyuche obvalennya odnopoverkhovykh karkasnykh vyrobnychykh budivel' ta poshuk mozhyvostey pidvyshchennya tochnosti rozrakhunkiv* [Analysis of calculation methods for progressive collapse of single-storey frame industrial buildings and search for opportunities to improve calculation accuracy]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2024, no. 1 (019), pp. 122–129. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.270224.122.1032. (in Ukrainian).

28. Mohamad Taklas, Moussa Leblouba, Samer Barakat, Ahmed Fageeri and Firass Mohamad. Concrete-to-concrete shear friction behavior under cyclic loading: experimental investigation. 2022. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13530-5> www.nature.com/scientificreports

Надійшла до редакції: 01.09.2025.

УДК 669.15:621.785

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.241225.77.1211

СПОСІБ ОТРИМАННЯ НАНОБЕЙНІТУ В СТАЛЯХ : СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ДЕЙНЕКО Л. М.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
ШПОРТКО Ю. В.^{2*}, *асп.*

¹ Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, ННІ «Дніпровський металургійний інститут» Українського державного університету науки і технологій, пр. Науки, 4, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 333-13-25, e-mail: leonid_deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

^{2*} Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, ННІ «Дніпровський металургійний інститут» Українського державного університету науки і технологій, пр. Науки, 4, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 448-14-65, e-mail: yurijshportko86@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-8644-9733

Анотація. Постановка проблеми. Тенденції розвитку в галузі машинобудівних матеріалів демонструють стійку тенденцію до підвищення їх міцності, в'язкості та пластичності. Це особливо виражено для сталей, оскільки вони конкурують з легкими сплавами та композитними матеріалами в багатьох сферах застосування. Поліпшення механічних властивостей сталей намагаються досягти шляхом утворення дисперсних складових мікроструктур, які можуть досягати нанорозміру, що забезпечує суттєве підвищення міцності без шкоди для в'язкості та пластичності металовиробів. **Мета статті** – аналіз сучасних способів отримання в сталевих виробках дисперсного структурного стану (наноструктурованого бейніту), який забезпечує поєднання високої міцності та пластичності в них. **Результати досліджень.** Здійснено аналіз літературних джерел, які присвячені перспективам отримання високоміцних сталей третього покоління з можливістю отримання дисперсних структурних станів, як нанобейнітові, безкарбідні бейнітні при реалізації обробки сталей по різних технологіям, у тому числі і по режимам Q&P (Quenching and Partitioning). Зазначено, що високовуглецеві наноструктуровані бейнітні сталі виготовляються шляхом тривалої ізотермічної термічної обробки у нижньому температурному інтервалі перетворення аустеніту, який зазвичай вище за температуру початку мартенситного перетворення (M_p). Показано, що час перетворення можна скоротити за допомогою додавання до складу сталей легуючих елементів, або попереднім утворенням мартенситу перед ізотермічним бейнітним перетворенням (тобто охолодження здійснюється нижче M_p, а потім температура металу підіймається вище M_p). Розглянуто метод отримання високоміцних матеріалів, який полягає в розробці низьковуглецевого наноструктурованого бейніту, який можна отримати за відносно невеликий час перетворення з міцністю, подібною до тієї, що була досягнута для високовуглецевої наноструктурованої сталі, а також з покращеною пластичністю і в'язкістю. Зазначено, що однією з розроблених модифікацій Q&P-технології є BQ&P (B – bainite). Суть даної технології полягає в отриманні безкарбідного бейніту на стадії первинного гартування. Виконано огляд сучасних тенденцій у розробці перспективних технологій термічної обробки високоміцних нанобейнітних сталей. **Висновок.** Показано, що сталі зі структурою нанобейніту характеризуються унікальним поєднанням високої міцності, пластичності та ударної в'язкості. Визнано, що отримання нанобейнітного структурного стану можливе в сталях та сплавах з різним вмістом вуглецю та легуючих елементів. Розглянута інноваційна багатоступенева термічна обробка, яка поєднує процеси бейнітизації та гартування і розподілу (BQ&P). Показано можливість здійснення технологічних впливів на метал з метою отримання структури нанорозмірного бейніту способом, який буде прийнятним для промислового виробництва металовиробів. Зазначено, що для підвищення конструкційної міцності в умовах зменшення жолоблення та деформації металовиробів складної геометричної форми доцільно використовувати термічне зміцнення з отриманням бейнітного або ферито-бейнітного структурного стану.

Ключові слова: *нанобейніт; безкарбідний нанобейніт; бейнітизація; гартування і розподіл (Q&P); механічні властивості*

METHOD OF OBTAINING NANOBAINITE IN STEELS : MODERN TECHNOLOGIES

DEINEKO L.M.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
SHPORTKO Yu.V.^{2*}, *PhD Stud.*

¹ Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, ESI “Dnipro Metallurgical Institute” of the Ukrainian State

University of Science and Technology, 4, Science Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (095) 333-13-25, e-mail: leonid_deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

^{2*} Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, ESI “Dnipro Metallurgical Institute” of the Ukrainian State University of Science and Technology, 4, Science Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 448-14-65, e-mail: yurijshportko86@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-8644-9733

Abstract. Statement of the problem. Trends in the development of engineering materials show a steady tendency toward increasing strength, toughness, and ductility. This is especially evident for steels, as they compete with lightweight alloys and composite materials in many fields of application. Improvements in the mechanical properties of steels are being pursued through the formation of exceptionally fine microstructures, reaching the nanoscale. This ensures a significant increase in strength without compromising toughness and ductility. **The purpose of the article** is to analysis of modern methods for obtaining a dispersed structural state (nanostructured bainite) in steel products, which provides a combination of high strength and ductility in them. **Research results.** The article analyzes scientific literature on the prospects of obtaining high-strength steels of the third generation with the possibility of obtaining such dispersed structural states as nanobainitic, carbide-free bainitic steels when implementing steel processing by Q&P (Quenching and Partitioning) modes. It is noted that high-carbon nanostructured bainitic steels are made by prolonged isothermal heat treatment at low temperatures above the temperature of the onset of martensitic transformation. It is shown that the transformation time can be reduced by adding alloying elements to the steel composition, ausforming, or by preliminary formation of martensite before isothermal bainite transformation. A method of obtaining high-strength materials is considered, which consists in the development of low-carbon nanostructured bainite, which can be obtained in a relatively short transformation time with strength similar to that achieved for high-carbon nanostructured steel, as well as with improved ductility and toughness. It is noted that one of the developed modifications of the Q&P technology is BQ&P (B – bainite). The essence of this technology is to obtain carbide-free bainite at the stage of primary quenching. A review of current trends in the development of promising technologies for heat treatment of high-strength nanobainitic steels is made. **Conclusion.** It is shown that steels with a nanobainite structure are characterized by a unique combination of high strength, ductility, and impact strength. It is indicated that nanobainite can be obtained in steels and alloys with different carbon and alloying elements. It is noted that many studies have been devoted to the development of low-carbon nanostructured bainite, which can be obtained in a relatively short transformation time with strength similar to that achieved for high-carbon nanostructured steel, as well as with improved ductility and toughness. An innovative multi-stage heat treatment combining bainitization and quenching and distribution (BQ&P) processes is considered. It is shown that it is possible to carry out technological effects on metal in the laboratory and obtain the structure of nanoscale bainite in a way that will be acceptable for the industrial production of metal products.

Keywords: *nanobainite; carbide-free nanobainite; bainitization; Quenching and Partitioning (Q&P); mechanical properties*

Постановка проблеми. Сталеві конструкції, що працюють в екстремальних умовах, вимагають матеріалів високого рівня властивостей. А промисловість потребує розробки нових підходів до обробки сталей з різним вмістом вуглецю, які забезпечать отримання деталей із високим рівнем характеристик механічних властивостей при зменшенні рівня остаточних напружень та жолоблення виробів.

Аналіз публікацій. В літературі за останні десятиліття опубліковані результати досліджень мікроструктури та механічних властивостей зміцнених сталей з високим рівнем (недосяжним раніше) механічних властивостей. Покращення механічних властивостей розглядається с точки зору оптимізації мікроструктури сталей через подрібнення складових структури до нанометрів [1; 2], фазове

перетворення, додаткове підвищення щільності дефектів кристалевої решітки та створення в металі раціонального структурного та субструктурного стану з дисперсними частинками вторинної фази, рівномірно розподіленими по об'єму металу.

В даний час у науці про матеріали велика увага приділяється їх структурі та властивостям, а також способам отримання в них наноструктурного стану.

Так ще в середині ХХ віку були отримані цікаві співвідношення міцності та пластичності, в'язкості в сталях з підвищеною концентрацією кремнію, які отримували при термічній обробці бейнітну структуру, у тому числі і по ізотермічним режимам (наприклад, роботи Allten A. G., Payson P., Owen W. S., Keh A. S., Leslie W. V., Spelch G. R., Averbach B. L., Alstetter C. J., Cohen M. та інших). Для

вітчизняних дослідників більш відомі результати досліджень Закея В. Ф., Паркера Е. Р. та інших у питаннях розробки сучасних конструкційних сплавів.

А в кінці ХХ віку вже з'явилися відомі наукові розробки, наприклад, Бхадешія та ін., які розглядали вже нанобейнітну структуру з чудовими властивостями у високовуглецевій та висококремнієвій сталі за допомогою процесу термічної обробки [3]. Відтоді сталі з нанобейнітним структурним станом привертають широку увагу [4–6].

Оскільки у вітчизняній літературі дані о способах отримання нанобейнітної структури практично відсутні, становить інтерес аналіз їх особливостей та перспектив в отриманні високоміцного стану сталей.

Мета статті – аналіз сучасних способів отримання в сталевих виробках дисперсного структурного стану (наноструктурованого бейніту), який забезпечує поєднання високої міцності та пластичності в них.

Результати та обговорення. Для задоволення постійно зростаючі потреби промисловості в інструментальних і конструкційних матеріалах, нові розробки передових машинобудівних сталей спрямовані на одночасне підвищення міцності, пластичності та в'язкості при зменшенні рівня жолоблення та деформацій виробів в процесі їх зміцнюючої або комбінованої термічної обробки. Поліпшення механічних властивостей сталей намагаються досягти шляхом утворення винятково дисперсних мікроструктур, які досягають нанорозміру, це забезпечує суттєве підвищення міцності без шкоди для в'язкості та пластичності. Сьогодні наноінженерія використовується для розробки надвисокоміцних сталей, як перспективної технології в металургії.

Передові високоміцні сталі третього покоління мають композитні мікроструктури, які складаються з дисперсних високоміцних фаз (наприклад, бейніту або мартенситу) і високої частки більш м'якої фази (наприклад, аустеніту), для оптимізації компромісу між міцністю та пластичністю. Це призвело до створення

нових концепцій, які пояснюють можливість отримання таких структурних станів, як нанобейнітові [7; 8], безкарбідні бейнітні [9] при реалізації обробки сталей по режимам Q&P (Quenching and Partitioning) [10].

Бейніт не є однорідною за складом фазою, це композит фаз, що складається переважно з пластинок фериту, але з вкрапленнями дрібних інших фаз, таких як карбіди та/або залишковий аустеніт. Цей структурний стан може бути створений рівномірно у об'ємі величезних конструкцій, таких як парові турбіни, або може використовуватися мікроскопічно, як обробка поверхневих шарів металу деталей для покращення її трибологічних властивостей. Ці структурні складові піддаються цілеспрямованим змінам у процесі їх отримання. Наприклад, їх масштаб можна регулювати від сотень мікрометрів до десятків нанометрів. Такі варіації відображаються на властивостях металовиробів, підкреслюючи універсальність впливу структурного стану.

Високовуглецеві наноструктуровані бейнітні сталі, які, наприклад, розглядаються в роботах Bhadeshia та ін. [3], виготовляються за допомогою термічних низькотемпературних ізотермічних перетворень, як правило, в діапазоні від 200 °С до 300 °С протягом довготривалих витримок, тобто обробки *austempering* для утворення нанорозмірного (20...100 нм) бейніту. Загалом відомо, що ці сталі мають надвисоку міцність і твердість, а також гарне подовження. Отримання таких властивостей як високої міцності та твердості пов'язані з нанорозмірними пластинами бейнітного фериту, високою щільністю дислокацій (дислокаційними лісами) та зміцненням твердого розчину, тоді як пластичність пов'язана з деформаційним мартенситним перетворенням або утворенням двійників у залишковому аустеніті під час деформації.

У роботі [11] були досліджені характеристики структури та механічних властивостей загартованої (*austenitization* протягом 15 хвилин за 1000 °С з наступним ізотермічним перетворенням за 200 °С

протягом 10 діб перед гартуванням у воді) високовуглецевої сталі з нанокристалічною бейнітною структурою. Виявлена імовірність пластичної релаксації в тонкій плівці залишкового аустеніту переважно за рахунок підвищеної щільності дислокацій, а також наявність аккомодативної нанодвійникової структури в блоковому залишковому аустеніті. Різні механізми розміщення в бейнітній сталі нанодвійникової структури можуть бути також результатом нерівномірного розподілу вуглецю в залишковому аустеніті.

На думку F. G. Caballero та ін. [12], мартенситне перетворення (*displacive transformation*) пов'язане з рухом границі розділу фаз. Цей рух може бути загальмований дефектами, *такими як дислокації*, дефекти упаковки або двійники в аустеніті. У процесі бейнітного перетворення аустеніту дефекти виникають, коли деформація структури, що супроводжує зародження і ріст бейніту, компенсується пластичною релаксацією навколишнього аустеніту. Зростаюча бейнітна пластинка зупиняється, коли вона стикається з межею зерна аустеніту і деформує аустеніт. Оскільки перетворення зміцненого аустеніту з підвищеною щільністю дефектів призводить до утворення тонких пластин, автори зазначають, що сплави можуть оброблятися в таких умовах, коли бейнітне перетворення пригнічується до низьких температур (до 125...350 °C) і це призводить до отримання нанорозмірної бейнітної мікроструктури.

У зв'язку з тим, що отримання наноструктурованого бейнітного стану в високовуглецевих сталях пов'язане з тривалою ізотермічною витримкою в нижньому інтервалі при температурах, вищих за температуру початку мартенситного перетворення, доцільно розглянути можливість скорочення часу ізотермічної витримки, для того, щоб виробництво цих сталей було економічним для промисловості. Відомо, що час перетворення можна скоротити за допомогою додавання до складу сталей легуючих елементів [13] або попереднім

утворенням мартенситу перед ізотермічним бейнітним перетворенням, що прискорює наступне бейнітне перетворення [14].

F.G. Caballero зі співавторами [15] з використанням теорії атомного перетворення, розробили та описали багатомасштабну структуру нанозернистих бейнітних високовуглецевих сталей з підвищеною концентрацією Si (1,5...3,0 мас. %), після їх ізотермічної витримки при температурах до 125...325 °C. Також, утворення двійників в аустенітних плівках ідентифіковано авто-рами, як механізм деформаційного зміцнення, що сприяє пластичності цих структур. Ці сталі показали видатні характеристики зносу та конкурентно-спроможні значення втомної міцності.

Вплив попередньо сформованого мартенситу на бейнітне перетворення досліджували Yuki Toji та ін. [16], яке відбувалося під час етапу розподілу в процесі Q&P. Дослідження було зосереджено на впливі попередньо сформованого мартенситу на кінетику подальшого перетворення по бейнітному механізму, морфологію та кристалографічну орієнтацію бейніту, який утворився згодом. Для визначення впливу Si на цей процес автори використовували дві сталі: 1,1 мас % C – 3 мас % Mn з 2 % мас. Si та без нього. Дослідження показали, що перетворення по бейнітному механізму явно прискорювалося попередньо виникаючим мартенситом як в сталях з кремнієм, так і в сталях без кремнію. Бейніт оточує попередньо існуючий мартенсит у сталі без кремнію, тоді як у сталі, що містить 2 % Si, він виникає всередині зерен аустеніту. Основне співвідношення орієнтації між бейнітом і прилеглим аустенітом було змінено за рахунок присутності мартенситу від Nishiyama-Wassermann (N-W) до Greninger-Troiano (G-T) незалежно від вмісту Si. Перед бейнітним перетворенням у сталі з вмістом Si 2 % спостерігалось чіткий розподіл вуглецю з мартенситу в аустеніт, чого не спостерігалось в сталі без кремнію. Автори припускають, що дислокації, введені в результаті мартенситного перетворення,

діють як основний фактор, який прискорює бейнітне перетворення, коли мартенсит виникає перед бейнітним перетворенням.

Слід зазначити, що в літературних джерелах [17] і раніше фіксували зменшення інкубаційного періоду бейнітного перетворення поблизу температури точки M_s , це пов'язується з ініціюючою дією деформаційного впливу мартенситного перетворення на зародження бейніту, а також на суттєве затримання бейнітного перетворення та зміну морфології залишкового аустеніту в сталях зі збільшеною концентрацією кремнію.

Автори роботи [18] подальше дослідили вплив попередньо сформованого мартенситу та його об'ємної частки на мікроструктуру та механічні властивості нанобейнітної підшипникової сталі. Після-довну кількість попередньо сформованого мартенситу від 0 % до 25 % вводили шляхом регулювання ізотермічної температури першої операції – отримання мартенситу. Згідно з дослідженнями введення попередньо сформованого мартенситу може покращити бейнітну мікроструктуру і збільшити об'ємну частку залишкового аустеніту, але при цьому, знижує його механічну стабільність. Коли об'ємна частка попередньо сформованого мартенситу становить менше 20 %, твердість і зносостійкість нанобейнітної підшипникової сталі поступово зростає, але в'язкість сталі поступово знижується зі збільшенням об'ємної частки попередньо сформованого мартенситу. Коли об'ємна частка попередньо сформованого мартенситу досягає 25 %, властивості нано-бейнітної сталі, особливо зносостійкість, явно погіршуються. За результатами комплексного порівняння механічних властивостей нанобейнітної підшипникової сталі автори визначили, що оптимальна об'ємна частка попередньо сформованого мартенситу становить ~10...15 %.

Peter Kirbiš та ін. [19] показали, що створити тонкі мікроструктури, які досягають нанорозміру, можна не застосовуючи зовнішню пластичну деформацію, а контролюючи фазове перетворення

аустеніту на ферит при низьких температурах. Утворення бейніту в сталях при температурах нижче приблизно 200 °C дозволяє отримувати об'ємні наноструктурні матеріали виключно термічною обробкою. Це надає переваги високої продуктивності, а також малі обмеження щодо форми та розміру заготовки порівняно з іншими методами виробництва наноструктурованих металів. Розробка нових бейнітних сталей базувалася на сплавах з високим вмістом Si або Al. Ці групи сталей відрізняються дуже тонкою мікроструктурою, що складається переважно з бейнітних феритових пластин і невеликої частки залишкового аустеніту, а також карбідів. Автори показали, що тонку структуру, в межах якої товщина окремих бейнітних феритових пластин може становити всього 5 нм, можна отримати виключно шляхом гартування та природного старіння без використання ізотермічного перетворення, яке є характерним для більшості бейнітних сталей. Передбачається, що необхідний час для природного старіння можна значно скоротити без зниження твердості, використовуючи сплави з меншим вмістом стабілізуючих аустеніт легуючих елементів. Завдяки тонкій структурі та низькому вмісту залишкового аустеніту ця група сталей може розвивати дуже високу твердість до 65 HRC, зберігаючи при цьому значний рівень ударної в'язкості.

Автори роботи [20] проаналізували термодинамічну доцільність формування нанобейніту в сталях, легованих Al із середнім вмістом Mn, за допомогою міжкритичного відпалу (intercritical annealing – IA) та подальшої термічної обробки. Метою дослідження було визначити вплив температури IA та вмісту Mn на стабільність аустеніту, температуру M_s та результуючу товщину бейнітної пластини (bainite plate thickness – BPT). Результати показують, що температурний діапазон IA 780...860 °C ефективно знижує температуру M_s , сприяючи утворенню нанобейніту. Результати показали, що вищий вміст Mn збільшує частку аустеніту

під час ІА, таким чином підвищуючи потенціал для утворення нанобейніту.

Інший метод отримання високоміцних матеріалів полягає в розробці низьковуглецевого наноструктурованого бейніту, який можна отримати за відносно невеликий час перетворення з міцністю, подібною до тієї, що була досягнута для високовуглецевої наноструктурованої сталі, а також з покращеною пластичністю і в'язкістю.

Дослідження Y. X. Zhoua та ін. [21] було присвячено вивченню способів отримання нанорозмірного бейніту для покращення механічних властивостей низьковуглецевої середньомарганцевої сталі (Mn був основним легуючим елементом для зниження температур M_s і B_s , тоді як Si додавали для уповільнення утворення цементиту). Інтереси авторів були зосереджені на впливі ізотермічної температури та часу бейнітного перетворення на мікроструктуру та механічні властивості досліджуваної сталі. Дослідження мікроструктури показали, що сталь складається з нанорозмірних ламелей з характеристиками радіального розташування бейнітного фериту і залишкового аустеніту середньої товщини ~ 120 нм. Об'ємна частка залишкового аустеніту досягала 32 % при концентрації в ньому вуглецю 1,75 мас %. Температура і час ізотермічної витримки при бейнітному перетворенні вплинули не тільки на морфологію бейніту, але й на об'ємну частку залишкового аустеніту, розподіл, мікроструктуру і концентрацію вуглецю в аустеніті, які відповідають за поєднання високої міцності і достатньої пластичності сталі.

Дослідження Avanish Kumar та ін. [22] показали, що можна сформувати наноструктурований бейніт у низьковуглецевих сталях менш ніж за 8 годин шляхом термічної обробки, що включає двоступеневу *austempering* (за 350 °C протягом 20 хвилин і 250 °C протягом 7 годин). Принцип, що лежить в основі цього, полягає в тому, щоб зменшити температуру M_s , незважаючи на почат-

ковий низький вміст вуглецю, за допомогою короткочасного *austempering*, таким чином наповнюючи залишковий аустеніт вуглецем. Автори показали, що розроблена за допомогою двох етапів ізотермічного перетворення нано-структурована низьковуглецева бейнітна сталь, продемонструвала надзвичайно високу ударну в'язкість на додаток до високої міцності та пластичності.

Останніми роками активно розвивається такий різновид ізотермічного гартування, як технологічна схема термічної обробки сталі «Quenching and Partitioning – Q&P» («Гартування та розподіл») [23]. Вона базується на теорії «Обмеженої парарівноваги вуглецю» («Constrained Carbon Paraequilibrium»), яку у 2003 році запропонував J. G. Speer і яка дозволяє розрахувати кількість вуглецю, який може дифундувати зі свіжого мартенситу гартування, який пересичений вуглецем, в аустеніт [24].

Застосування процесу гартування та розподілу (Q&P) для сталей передбачає мікроструктурні зміни, які є більш складними, ніж просто утворення мартенситу з подальшим розподілом вуглецю від мартенситу до аустеніту. Прикладами такої складності є утворення епітаксialного фериту під час першого етапу гартування, утворення бейніту, карбідів і градієнтів вуглецю, а також міграція границь розділу мартенсит/аустеніт під час етапу розподілу. В роботі авторами проаналізовано дослідження механізмів, що контролюють мікроструктурні зміни під час застосування Q&P-процесу, які дозволять розробити концепції проектування Q&P-сталей на основі фазових перетворень [25].

Серед різноманітних морфологічних форм бейніту значний інтерес представляє структура дисперсного бейнітного фериту без виділення карбідів цементитного типу у поєднанні зі стабільним залишковим аустенітом (безкарбідний бейніт), що обумовлено тим, що цементитні включення є концентраторами напружень і сприяють зародженню та розвитку тріщини.

Метою процесу гартування та розподілу (Q&P) при термічній обробці сталі є збагачення аустеніту вуглецем під час розподілу після початкового переохолодження нижче температури початку мартенситного перетворення (M_s). A. J. Clarke та ін. [26] запропонували два механізми збагачення аустеніту вуглецем під час стадії розподілу. Вони припускають або виділення вуглецю з мартенситу, або утворення безкарбідного бейніту під час стадії розподілу, які порівнюються з прямими експериментальними вимірюваннями утворених фракцій аустеніту.

Зважаючи на свою перспективність, базова Q&P-технологія постійно розвивається, розробляються різні модифікації, метою яких є усунення її недоліків, або подальше підвищення комплексу якості сталі.

Однією з розроблених модифікацій Q&P-технології є BQ&P (B – *bainite*) – суть даної технології полягає в отриманні безкарбідного бейніту на стадії первинного гартування.

Дослідження Xiaolu Gui та ін. [27] проводились для вивчення обробки BQ&P у середньовуглецевій легованій сталі Mn-Si-Cr. Мета дослідження полягала в з'ясуванні впливу морфології та об'ємної частки бейніту, отриманого шляхом *austempering* при різних температурах бейнітного перетворення, на мікро-структурну еволюцію та механічні властивості сталі BQ&P. Автори показали, що оптимальне поєднання міцності та пластичності було досягнуто в сталі BQ&P, коли температура *bainitic austempering* становила 360 °C (межа міцності на розрив: 1495 МПа; рівномірне подовження та загальне подовження: 26,2 % та 31,8 %; зменшення площі: 47,9 %). Окрім викликаного перетворенням ефекту пластичності залишкового аустеніту та композитного ефекту багатофазності після обробки BQ&P, формування безкарбідного бейніту також відіграє значну роль у покращенні механічних властивостей. Безкарбідний бейніт може підвищити стійкість до пошкоджень багатофазної сталі

завдяки додатковій деформаційній міцності в локальній зоні пластичної деформації біля вершини мікротріщини. У цьому випадку слід належним чином контролювати фракцію та розподіл CFB та уникати макросегрегації.

З попередніх досліджень відомо, що змішана мікроструктура бейніту та мартенситу може ефективно підвищувати міцність та в'язкість сталі. Це пояснюється подрібненням мікроструктури, спричиненим геометричним розчленуванням попереднього зерна аустеніту бейнітним феритом, який утворився ізотермічно перед гартуванням, та більшими енерговитратами на поширення тріщин. Ґрунтуючись на цій концепції, в роботі [28] запропоновано новий метод низькотемпературного бейнітного ізотермічного перетворення з неповним одноступеневим гартуванням і розподілом (BQ&P) для бейнітної сталі 0,2 C–1,5 Si–1,8 Mn. Було досліджено мікроструктуру та механічні властивості, особливо ударну в'язкість сталі після мартенситного (Q&T) і повного бейнітного перетворення з неповним одноступеневим гартуванням і розподілом (B₃-Q&P, B₃₀-QP – підрядковий індекс 3 або 30 вказує на ізотермічну витримку 3 або 30 хв для бейнітного перетворення).

Інноваційна багатоступенева термічна обробка, яка поєднує процеси бейнітизації та гартування і розподілу (BQ&P), може бути застосована для отримання багатофазної мікроструктури, що містить безкарбідний нанобейніт, надтонкий мартенсит і залишковий аустеніт для покращення властивості цементованого поверхневого шару та серцевини виробів. У дослідженні [29] цементована середньовуглецева легована сталь Cr–Si–Mn була оброблена *bainitic austempering* в поєднанні з BQ&P з 20 і 40 % ступенем бейнітного перетворення. Цементация призводить до збільшення вмісту вуглецю в сталі, що дозволяє отримати дуже тонку складну мікроструктуру в виробу, яка поступово змінюється в межах градієнта вуглецю по перерізу. Було показано, що процес BQ&P дозволив отримати більш високу твердість і

зносостійкість виробу в порівнянні з простою *bainitic austempering*. Покращення властивостей є результатом зміцнюючого впливу додаткової фракції мартенситу та більшої кількості стабілізованого аустеніту, схильного до трансформації при терті (трансформаційна індукована пластичність, TRIP-ефект). Крім того, скориговані параметри процесу призводять до сприятливих механічних властивостей у середньовуглецевій серцевині (межа текучості (YS) $\sim 1\,430$ МПа, межа міцності (UTS) $\sim 1\,820$ МПа, ударна в'язкість (KV) ~ 20 Дж/см²). Можливість регулювати механічні та експлуатаційні властивості сталі шляхом контролю частки певних фаз, а також значне скорочення часу термічної обробки може зробити процес BQ&P придатним для промислового застосування, наприклад, для виробництва цементованих зубчастих коліс.

Практичний досвід авторів при створенні режимів та технологій зміцнюючої термічної обробки різноманітних сталевих деталей зі структурою бейніту (або бейніту і мартенситу та бейніту і фериту) підтверджує доцільність широкого розвитку такого напрямку. Він дозволяє збільшити термін експлуатації механізмів та конструкцій при зменшенні їх матеріаломісткості, а також знизити збитки від можливих відмов деталей машин та елементів металевих споруд.

Слід зазначити, що в промислових умовах реалізувати процеси зміцнюючої термічної обробки металовиробів з ізотермічними витримками більшими ніж 30–40 хвилин складно реалізувати по різних причинах. Авторами розроблені та реалізовані в промисловості технологія термічної обробки (яка поєднує режими, конструктивно-технологічні параметри обладнання та охолоджувальні середовища) для отримання в маловуглецевих низьколегованих сталях бейнітної або ферито-бейнітної структури при зменшенні рівня жолоблення виробів складної геометричної форми. Встановлені закономірності процесів структуро-

утворення в металі з таким структурним станом при подальших відпусках.

Висновки

До основних висновків, які можна зробити на підставі аналізу різних джерел інформації, належать:

1. Показано, що сталі зі структурою нанобейніту характеризуються унікальним поєднанням високої міцності, пластичності та ударної в'язкості, що робить їх перспективними для використання у відповідальних конструкціях, які працюють в умовах високих навантажень та агресивних середовищ.

2. Вказано, що отримання нанобейніту можливе в сталях та сплавах з різним вмістом вуглецю та легуючих елементів. Легування кремнієм, алюмінієм пригнічує утворення цементиту та забезпечує стабілізацію залишкового аустеніту, марганець є легуючим елементом для зниження температур M_s і B_s та ще підвищує прогартуваність, що покращує механічні властивості сталі.

3. Зазначено, що високовуглецеві наноструктуровані бейнітні сталі часто не відповідають технологічним та комерційним вимогам. Тому, багато досліджень присвячені розробці низьковуглецевого наноструктурованого бейніту, який можна отримати за відносно невеликий час перетворення з міцністю, близькою до тієї, що була досягнута для високовуглецевої наноструктурованої сталі, а також з покращеною пластичністю і в'язкістю. Це є економічно і технологічно ефективним для промислового виробництва.

4. Розглянута доцільність використання інноваційної багатоступеневої термічної обробки, яка поєднує процеси бейнітизації та гартування і розподілу (BQ&P). Вона може бути застосована для отримання багатофазної мікроструктури, яка містить безкарбідний нанобейніт.

5. Проведений аналіз отримання наноструктурованого бейніту в сталях припускає здійснення в лабораторних умовах технологічних впливів на метал в процесі його термічної або комбінованої

обробки з метою суттєвого збільшення рівня дефектності структури для цілеспрямованого впливу на подальші процеси структуроутворення і отримання структури нанорозмірного бейніту способом, який буде прийнятним для промислового виробництва металовиробів. При цьому авторами передбачається використовувати подібні розробки для

підвищення експлуатаційної стійкості інструменту для деформування, зокрема для ножів холодного та гарячого різання.

Результати досліджень отримані при фінансовій підтримці Національного фонду досліджень України у межах проекту (реєстраційний номер 2025.06/0084).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hu J., Shi Y. N., Sauvage X., Sha G., Lu K. Grain boundary stability governs hardening and softening in extremely fine nanograined metals. *Science*. 2017. № 355. Pp. 1292–1296. URL: <https://doi.org/10.1126/science.aal5166>
2. Zhou X., Li X. Y., Lu K. Enhanced thermal stability of nanograined metals below a critical grain size. *Science*. 2018. № 360. Pp. 526–530. URL: <https://doi.org/10.1126/science.aar6941>
3. Bhadeshia H. K. D. H. The first bulk nanostructured metal. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2013. № 14. Pp. 014202. URL: <https://doi.org/10.1088/1468-6996/14/1/014202>
4. Zhao J., Hou C. S., Zhao G., Zhao T., Zhang F. C., Wang T. S. Microstructures and mechanical properties of bearing steels modified for preparing nanostructured bainite. *J. Mater. Eng. Perform.* 2016. № 25. Pp. 4249–4255. URL: <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2289-8>
5. Wasiluk K., Skolek E., S'witnicki W. Microstructure and properties of surface layer of carburized 38CrAlMo6-10 steel subjected to nanostructuring by a heat treatment process. *Arch. Metall. Mater.* 2014. № 59. Pp. 1685–1690. URL: <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0285>
6. Zhi C., Zhao A. M., He J. G., Zhao F. Q., Che Y. J. Thermodynamic analysis and strength-toughness research of nanobainite. *Chin. J. Eng.* 2016. № 38. Pp. 691–698. URL: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2016.05.014>
7. Caballero F. G., Bhadeshia H. K. D. H., Mawella K. J. A., Jones D. G., Brown P. Very strong low temperature bainite. *Materials science and technology*. 2002. № 18 (3). Pp. 279–284. URL: <https://doi.org/10.1179/026708301225000725>
8. Rosalia Rementeria, Jose A. Jimenez, Sébastien Y. P. Allain, Guillaume Geandier, Jonathan D. Poplawsky, Wei Guo, Esteban Urones-Garrote, Carlos Garcia-Mateo, Francisca G. Caballero Quantitative assessment of carbon allocation anomalies in low temperature bainite. *Acta Materialia*. 2017. № 133. Pp. 333–345. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.05.048>
9. Jean-Christophe Hell, Moukrane Dehmas, Sébastien Allain, Juscelino Mendes Prado, Alain Hazotte, Jean-Philippe Chateau. Microstructure-properties relationships in carbide-free bainitic steels. *ISIJ international*. 2011. № 51 (10). Pp. 1724–1732. URL: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.1724>
10. Samy Aoued, Frédéric Danoix, Sébastien Y. P. Allain, Steve Gaudez, Guillaume Geandier, Jean-Christophe Hell, Michel Soler, Mohamed Gouné. Microstructure evolution and competitive reactions during quenching and partitioning of a model Fe–C–Mn–Si alloy. *Metals*. 2020. № 10 (1). Pp. 137. URL: <https://doi.org/10.3390/met10010137>
11. Chih-Yuan Chen Microstructure characterization of nanocrystalline bainitic steel during tempering. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. № 762. Pp. 340–346. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.05.174>
12. Caballero F. G., Hung-Wei Yen, Miller M. K., Jer-Ren Yang, Cornide J., Garcia-Mateo C. Complementary use of transmission electron microscopy and atom probe tomography for the examination of plastic accommodation in nanocrystalline bainitic steels. *Acta Materialia*. 2011. № 59 (15). Pp. 6117–6123. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.06.024>
13. Sahand Golchin, Behzad Avishan, Sasan Yazdani. Effect of 10 % ausforming on impact toughness of nano bainite austempered at 300 °C. *Materials Science and Engineering : A*. 2016. № 656. Pp. 94–101. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.01.025>
14. Закей В. Ф., Паркер Е. Р. Успехи в разработке сплавов на основе железа. *Fundamental aspects of structural alloy design*. Ed.: R. I. Jaffee, B. A. Wilcox. Battelle Institute Materials Science Colloguia, 1975. Pp. 86–111.
15. Francisca G. Caballero, Rosalia Rementeria, Lucia Morales-Rivas, Miguel Benito-Alfonso, Jer-Ren Yang, David de Castro, Jonathan D. Poplawsky, Thomas Sourmail and Carlos Garcia-Mateo Understanding Mechanical Properties of Nano-Grained Bainitic Steels from Multiscale Structural Analysis. *Metals*. 2019. № 9. Pp. 426. URL: <https://doi.org/10.3390/met9040426>
16. Toji Yuki, Matsuda Hiroshi, Raabe Dierk. Effect of Si on the acceleration of bainite transformation by pre-existing martensite. *Acta Materialia*. 2016. № 116. Pp. 250–262. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.044>

17. Kawata H., Hayashi K., Sugiura N., Yoshinaga N., Takahashi M. Effect of martensite in initial structure on bainite transformation. *Mater. Sci. Forum.* 2010. № 638–642 Pp. 3307–3312. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.3307>
18. Decheng Jia, Dongyun Sun, Qingchao Wang, Feng Liu, Yanguo Li, Sujuan Yuan, Zhinan Yang, Fucheng Zhang. Effects of Preformed Martensite on Microstructure and Mechanical Properties of Nanobainite Bearing Steel. *Metals.* 2023. № 13. Pp. 99. URL: <https://doi.org/10.3390/met13010099>
19. Peter Kirbiš, Ivan Anžel, Rebeka Rudolf, Mihael Brunc̃ko. Novel Approach of Nanostructured Bainitic Steels' Production with Improved Toughness and Strength. *Metals.* 2020. № 13. Pp. 1220. URL: <https://doi.org/10.3390/ma13051220>
20. Mateusz Morawiec, Jarosław Opara, Adam Grajcar. Nanobainite formation in high-Al medium-Mn steels : thermodynamic approach. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13441-9>
21. Zhou Y. X., Song X. T., Liang J. W., Shen Y. F., Misra R. D. K. Innovative processing of obtaining nanostructured bainite with high strength – high ductility combination in low-carbon-medium-Mn steel : Process-structure-property relationship. *Materials Science and Engineering : A.* 2018. № 718. Pp. 267–276. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.01.120>
22. Avanish Kumar, B. Blessto, Aparna Singh. Development of a low-carbon carbide-free nanostructured bainitic steel with extremely high strength and toughness. *Materials Science and Engineering : A.* 2023. № 877. Pp. 145–186. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145186>
23. Speer John G., Edmonds David V., Rizzo Fernando C., Matlock David K. Partitioning of carbon from supersaturated plates of ferrite, with application to steel processing and fundamentals of the bainite transformation. *Solid State and Materials Science.* 2004. № 8. pp. 219–237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2004.09.003>
24. Speer J., Matlock D. K., De Cooman B. C., Schroth J. G. Carbon partitioning into austenite after martensite transformation. *Acta Materialia.* 2003. no. 51. pp. 2611–2622. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00059-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00059-4)
25. Santofimia M. J., Zhao L., Sietsma J. Overview of Mechanisms Involved During the Quenching and Partitioning Process in Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A.* 2011. № 42A. Pp. 3620–3626. URL: <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0706-z>
26. Clarke A. J., Speer J. G., Miller M. K., Hackenberg R. E., Edmonds D. V., Matlock D. K., Rizzo F. C., Clarke K. D., De Moor E. Carbon partitioning to austenite from martensite or bainite during the quench and partition (Q&P) process : a critical assessment. *Acta Materialia.* 2008. № 56 (1). Pp. 16–22. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.08.051>
27. Xiaolu Gui, Guhui Gao, Haoran Guo, Feifan Zhao, Zhunli Tan, Bingzhe Bai. Effect of bainitic transformation during BQ&P process on the mechanical properties in an ultrahigh strength Mn–Si–Cr–C steel. *Materials Science and Engineering : A.* 2017. № 684. Pp. 598–605. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.12.097>
28. Yuyin Huang, Qiangguo Li, Xuefei Huang, Weigang Huang. Effect of bainitic isothermal transformation plus Q&P process on the microstructure and mechanical properties of 0.2C bainitic steel. *Materials Science and Engineering: A.* 2016. № 678. Pp. 339–346. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.10.011>
29. Krzysztof Wasiaka, Monika Wesierska-Hinca, Emilia Skoleka, Wiesław A. S'wiatnickia, Andrzej Wieczorek. Effect of a novel Bainitization Quenching & Partitioning heat treatment on multiphase microstructure evolution and properties of carburized Cr–Mn–Si alloyed steel. *SSRN Electronic Journal.* 2022. URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4021764>

REFERENCES

1. Hu J., Shi Y.N., Sauvage X., Sha G. and Lu K. Grain boundary stability governs hardening and softening in extremely fine nanograined metals. *Science.* 2017, no. 355, pp. 1292–1296. URL: <https://doi.org/10.1126/science.aal5166>
2. Zhou X., Li X.Y. and Lu K. Enhanced thermal stability of nanograined metals below a critical grain size. *Science.* 2018, no. 360, pp. 526–530. URL: <https://doi.org/10.1126/science.aar6941>
3. Bhadeshia H.K.D.H. The first bulk nanostructured metal. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2013, no. 14, pp. 014202. URL: <https://doi.org/10.1088/1468-6996/14/1/014202>
4. Zhao J., Hou C.S., Zhao G., Zhao T., Zhang F.C. and Wang T.S. Microstructures and mechanical properties of bearing steels modi-fied for preparing nanostructured bainite. *J. Mater. Eng. Perform.* 2016, no. 25, pp. 4249–4255. URL: <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2289-8>
5. Wasliluk K., Skolek E. and S'witnicki W. Microstructure and properties of surface layer of carburized 38CrAlMo6-10 steel sub-jected to nanostructuring by a heat treatment process. *Arch. Metall. Mater.* 2014, no. 59, pp. 1685–1690. URL: <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0285>
6. Zhi C., Zhao A.M., He J.G., Zhao F.Q. and Che Y.J. Thermodynamic analysis and strength-toughness research of nanobainite. *Chin. J. Eng.* 2016, no. 38, pp. 691–698. URL: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2016.05.014>

7. Caballero F.G., Bhadeshia H.K.D.H., Mawella K.J.A., Jones D.G. and Brown P. Very strong low temperature bainite. *Materials Science and Technology*. 2002, no. 18 (3), pp. 279–284. URL: <https://doi.org/10.1179/026708301225000725>
8. Rosalia Rementeria, Jose A. Jimenez, Sébastien Y.P. Allain, Guillaume Geandier, Jonathan D. Poplawsky, Wei Guo, Esteban Urones-Garrote, Carlos Garcia-Mateo and Francisca G. Caballero Quantitative assessment of carbon allocation anomalies in low temperature bainite. *Acta Materialia*. 2017, no. 133, pp. 333–345. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.05.048>
9. Jean-Christophe Hell, Moukrane Dehmas, Sébastien Allain, Juscelino Mendes Prado, Alain Hazotte and Jean-Philippe Chateau. Microstructure-properties relationships in carbide-free bainitic steels. *ISIJ international*. 2011, no. 51 (10), pp. 1724–1732. URL: <https://doi.org/10.2355/isiinternational.51.1724>
10. Samy Aoued, Frédéric Danoix, Sébastien Y.P. Allain, Steve Gaudez, Guillaume Geandier, Jean-Christophe Hell, Michel Soler and Mohamed Gouné. Microstructure evolution and competitive reactions during quenching and partitioning of a model Fe–C–Mn–Si alloy. *Metals*. 2020, no. 10 (1), pp. 137. URL: <https://doi.org/10.3390/met10010137>
11. Chih-Yuan Chen Microstructure characterization of nanocrystalline bainitic steel during tempering. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018, no. 762, pp. 340–346. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.05.174>
12. Caballero F.G., Hung-Wei Yen, Miller M. K., Jer-Ren Yang, Cornide J. and Garcia-Mateo C. Complementary use of transmission electron microscopy and atom probe tomography for the examination of plastic accommodation in nanocrystalline bainitic steels. *Acta Materialia*. 2011, no. 59 (15), pp. 6117–6123. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.06.024>
13. Sahand Golchin, Behzad Avishan and Sasan Yazdani. Effect of 10 % ausforming on impact toughness of nano bainite austempered at 300 °C. *Materials Science and Engineering : A*. 2016, no. 656, pp. 94–101. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.01.025>
14. Zakei V.F. and Parker E.R. *Uspekhy v razrabotke splavov na osnove zheleza* [Advances in the development of iron-based alloys]. *Fundamental Aspects of Structural Alloy Design*. Ed.: R.I.Jaffee and B.A. Wilcox. Battelle Institute Materials Science Colloguia, 1975, pp. 86–111. (in Russian).
15. Francisca G. Caballero, Rosalia Rementeria, Lucia Morales-Rivas, Miguel Benito-Alfonso, Jer-Ren Yang, David de Castro, Jonathan D. Poplawsky, Thomas Sourmail and Carlos Garcia-Mateo. Understanding Mechanical Properties of Nano-Grained Bainitic Steels from Multiscale Structural Analysis. *Metals*. 2019, no. 9, pp. 426. URL: <https://doi.org/10.3390/met9040426>
16. Toji Yuki, Matsuda Hiroshi and Raabe Dierk. Effect of Si on the acceleration of bainite transformation by pre-existing martensite. *Acta Materialia*. 2016, no. 116, pp. 250–262. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.044>
17. Kawata H., Hayashi K., Sugiura N., Yoshinaga N. and Takahashi M. Effect of martensite in initial structure on bainite transformation. *Mater. Sci. Forum*. 2010, no. 638–642, pp. 3307–3312. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.3307>
18. Decheng Jia, Dongyun Sun, Qingchao Wang, Feng Liu, Yanguo Li, Sujuan Yuan, Zhinan Yang and Fucheng Zhang. Effects of Preformed Martensite on Microstructure and Mechanical Properties of Nanobainite Bearing Steel. *Metals*. 2023, no. 13, pp. 99. URL: <https://doi.org/10.3390/met13010099>
19. Peter Kirbiš, Ivan Anžel, Rebeka Rudolf and Mihael Brunc'ko. Novel Approach of Nanostructured Bainitic Steels' Production with Improved Toughness and Strength. *Metals*. 2020, no. 13, pp. 1220. URL: <https://doi.org/10.3390/ma13051220>
20. Mateusz Morawiec, Jarosław Opara and Adam Grajcar. Nanobainite formation in high-Al medium-Mn steels : thermodynamic approach. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13441-9>
21. Zhou Y.X., Song X.T., Liang J.W., Shen Y.F. and Misra R.D.K. Innovative processing of obtaining nanostructured bainite with high strength – high ductility combination in low-carbon-medium-Mn steel : Process-structure-property relationship. *Materials Science and Engineering : A*. 2018, no. 718, pp. 267–276. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.01.120>
22. Avanish Kumar, B. Blessto and Aparna Singh. Development of a low-carbon carbide-free nanostructured bainitic steel with extremely high strength and toughness. *Materials Science and Engineering : A*. 2023, no. 877, pp. 145–186. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145186>
23. Speer John G., Edmonds David V., Rizzo Fernando C. and Matlock David K. Partitioning of carbon from supersaturated plates of ferrite, with application to steel processing and fundamentals of the bainite transformation. *Solid State and Materials Science*. 2004, no. 8, pp. 219–237. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2004.09.003>
24. Speer J., Matlock D.K., De Cooman B.C. and Schroth J.G. Carbon partitioning into austenite after martensite transformation. *Acta Materialia*. 2003, no. 51, pp. 2611–2622. URL: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(03\)00059-4](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00059-4)
25. Santofimia M.J., Zhao L. and Sietsma J. Overview of Mechanisms Involved During the Quenching and Partitioning Process in Steels. *Metallurgical and Materials Transactions : A*. 2011, no. 42A, pp. 3620–3626. URL: <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0706-z>

26. Clarke A.J., Speer J.G., Miller M.K., Hackenberg R.E., Edmonds D.V., Matlock D.K., Rizzo F.C., Clarke K.D. and De Moor E. Carbon partitioning to austenite from martensite or bainite during the quench and partition (Q&P) process : a critical assessment. *Acta Materialia*. 2008, no. 56 (1), pp. 16–22. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.08.051>
27. Xiaolu Gui, Guhui Gao, Haoran Guo, Feifan Zhao, Zhunli Tan and Bingzhe Bai. Effect of bainitic transformation during BQ&P process on the mechanical properties in an ultrahigh strength Mn–Si–Cr–C steel. *Materials Science and Engineering : A*. 2017, no. 684, pp. 598–605. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.12.097>
28. Yuyin Huang, Qiangguo Li, Xuefei Huang and Weigang Huang. Effect of bainitic isothermal transformation plus Q&P process on the microstructure and mechanical properties of 0.2C bainitic steel. *Materials Science and Engineering : A*. 2016, no. 678, pp. 339–346. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.10.011>
29. Krzysztof Wasiaka, Monika Wesierska-Hinca, Emilia Skoleka, Wieslaw A. Swiatnickia and Andrzej Wiczorek. Effect of a novel Bainitization Quenching & Partitioning heat treatment on multiphase microstructure evolution and properties of carburized Cr–Mn–Si alloyed steel. *SSRN Electronic Journal*. 2022. URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4021764>

Надійшла до редакції: 12.05.2025.

УДК 69.059:697.1:69.003.121:624.042.4
DOI: 10.30838/UJCEA.2312.241225.89.1212

АНАЛІЗ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЇ ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЇ ТИПОВИХ БАГАТОПОВЕРХОВИХ ЖИТЛОВИХ БУДІВЕЛЬ

ЗАЙЦЕВ В. І., *асп.*

Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-66, e-mail: zaytsewikt@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-1040-6545

Анотація. *Постановка проблеми.* Багатоквартирні багатоповерхові будинки типової забудови характеризуються високим рівнем енергоспоживання та не відповідають чинним державним нормам з енергоефективності, а застаріла інфраструктура майже вичерпала свій ресурс і потребує значної модернізації. *Мета статті.* У цій статті шляхом аналізу нормативно-правових документів і наукових публікацій щодо стану житлового фонду та інженерних систем розглядаються шляхи вдосконалення організаційно-технологічних рішень під час реконструкції житлових будівель типових серій з метою підвищення їх енергоефективності. *Висновок.* Досліджено потенціал модернізації теплового контуру та інженерних систем шляхом впровадження сучасних технологій, враховуючи обмеження існуючих архітектурно-конструктивних рішень. Запропоновано інноваційні підходи до підвищення енергоефективності, зокрема інтеграцію сонячних електричних систем з рідинним охолодженням у фасадні системи, створення комбінованих децентралізованих систем опалення та застосування уніфікованих BIM-моделей для типових серій. Водночас, впровадження комплексної енергомодернізації залежить від державної підтримки та зацікавленості кінцевих споживачів і стикається з низкою значних викликів, серед яких високі початкові капіталовкладення, складність інтеграції різнорідних систем, а також організаційні та соціальні бар'єри. Для подолання цих перешкод і активізації процесів модернізації пропонується розробити стандартизовані проектні рішення, уніфіковану методику економічної оцінки та забезпечити адаптацію інноваційних рішень до умов масового впровадження.

Ключові слова: багатоквартирні будинки; енергоефективність; реконструкція; термомодернізація; інженерні системи; опалення та вентиляція; відновлювані джерела енергії; BIM; економічна оцінка

ANALYSIS OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR THE COMPREHENSIVE THERMAL MODERNIZATION OF TYPICAL MULTI-STOREY RESIDENTIAL BUILDINGS

ZAITSEV V.I., *PhD Stud.*

Department of Organisation and Management in Construction, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-66, e-mail: zaytsewikt@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-1040-6545

Abstract. *Raising of problem.* Multifamily high-rise buildings of typical construction are characterized by high energy consumption and do not comply with current state energy efficiency standards. Their outdated infrastructure has almost exhausted its resource and requires significant modernization. *Purpose of the article.* This article analyzes regulatory documents and scientific publications concerning the state of the housing stock and engineering systems to explore ways of improving organizational and technological solutions during the reconstruction of typical series residential buildings, aiming to enhance their energy efficiency. *Conclusion.* The potential for modernizing the thermal envelope and engineering systems through the implementation of modern technologies is investigated, taking into account the limitations of existing architectural and structural solutions. Innovative approaches to improving energy efficiency are proposed, including the integration of liquid-cooled solar electric systems into facade systems, the creation of combined decentralized heating systems, and the application of unified BIM models for typical series. However, the implementation of comprehensive energy modernization depends on state support and the interest of end-users, and faces a number of significant challenges, including high initial capital investments, the complexity of integrating heterogeneous systems, as well as organizational and social barriers. To overcome these obstacles and activate modernization processes, it is proposed to develop standardized design solutions, a unified economic evaluation methodology, and ensure the adaptation of innovative solutions to conditions of mass implementation.

Keywords: *multi-story buildings; energy efficiency; reconstruction; thermal modernization; engineering systems; heating and ventilation; renewable energy sources; BIM; economic evaluation*

Постановка проблеми. Згідно з Паризькою кліматичною угодою, прийнятою у 2015 році, країни-учасниці взяли на себе зобов'язання «Національно Визначені Внески» (Nationally Determined Contributions, NDC), які визначають їх власні цілі та заходи у боротьбі зі зміною клімату.

Відповідно до NDC 2.0 від 31 липня 2021 р., Україна взяла на себе зобов'язання досягти цільового показника скорочення викидів парникових газів на 65 % до 2030 року порівняно з 1990 роком (включаючи землекористування, зміни землекористування та лісового господарства), досягнувши вуглецевої нейтральності до 2060 року, як це передбачено Національною економічною стратегією до 2030 року, схваленою постановою Кабінету Міністрів України від 3 березня 2021 року № 179 [1].

Програма ООН з навколишнього середовища в своєму «Звіті про глобальний стан будівель та будівництва 2024-2025: ключові повідомлення» [2] наголошує, що при експлуатації будівель споживається 32 % глобальної енергії і створюється 34 % глобальних викидів CO₂. Також цей звіт визначає шість ключових викликів для скорочення викидів у будівельному секторі:

1. Впровадження обов'язкових енергетичних норм з нульовим рівнем вуглецевих викидів для будівель.
2. Модернізація будівель для підвищення енергоефективності.
3. Впровадження використання відновлюваних джерел енергії в будівлях.
4. Інтеграція NDC 3.0 у будівельні норми.
5. Обмеження викидів втіленого вуглецю в будівельних нормах.
6. Вирішення критичного виклику щодо фінансування в енергоефективність з метою подвоєння глобальних інвестицій.

В Україні значна частка міського населення проживає в багатоквартирних багатоповерхових будинках типової забудови, зведених у період 1955–1992

років. Ці об'єкти характеризуються високим рівнем енергоспоживання та не відповідають чинним вимогам енергетичної ефективності, передбаченими державними будівельними нормами.

Крім того, застаріла інфраструктура, яка майже вичерпала свій ресурс, була значною мірою пошкоджена або знищена під час військових дій і потребує значної перебудови.

Централізована система теплопостачання (ТП), яка домінує в структурі теплового забезпечення житлового фонду, є технічно вразливою: вона має значну протяжність, високі експлуатаційні втрати тепла та низьку гнучкість у задоволенні індивідуальних потреб споживачів. Крім того, тривала зупинка циркуляції теплоносія може призвести до його замерзання, що загрожує виведенням із ладу всієї системи.

В м. Дніпро при проектуванні та будівництві багатоквартирних будинків, було організоване централізоване гаряче водопостачання (ГВП). Починаючи з 2000-х років, спостерігається тенденція до зниження кількості абонентів централізованого ГВП. Отже, забезпечення ГВП у багатоквартирних житлових будинках здійснюється децентралізовано – нагрів води відбувається безпосередньо на місці споживання. Для цього мешканці використовують побутові водонагрівальні прилади, зокрема електричні бойлери, газові водонагрівачі (колонки), а також двоконтурні котли індивідуального опалення.

Оскільки питання термомодернізації із зниженням питомого енергоспоживання, і як наслідок, скорочення викидів парникових газів, стосується мільйонів українських домогосподарств, які нині мешкають у житлових будинках типових серій, розв'язання зазначених питань є надзвичайно актуальною науково-прикладною задачею, що потребує комплексного підходу до реконструкції житлового фонду, модернізації інженерної

інфраструктури та впровадження сучасних енергозберігаючих технологій.

Метою статті є пошук шляхів вдосконалення організаційно-технологічних рішень реконструкції житлових будівель типових серій та інженерних мереж із урахуванням підвищення рівня їх енергоефективності.

Аналіз публікацій. Основне функціональне призначення житлової будівлі полягає у забезпеченні безпечного та комфортного приватного простору, що задовольняє базові потреби людей для відпочинку та повсякденного побуту.

Огороджувальні конструкції будівлі формують тепловий контур будівлі, мінімізуючи впливи навколишнього середовища, включаючи атмосферні опади, вітрові навантаження, термічні коливання, інсоляцію та акустичний вплив.

Інженерні системи, такі як системи опалення, вентиляції, кондиціонування та освітлення, регулюють параметри внутрішнього повітряного середовища (температури, вологості, швидкості руху повітря, газового складу) та рівня освітленості, створюючи необхідні мікрокліматичні умови для життєдіяльності людини.

Відповідно до ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія» [3], зовнішня температура повітря в Україні залежить від кліматичної зони і протягом року коливається в межах від -42°C взимку до $+41^{\circ}\text{C}$ влітку.

Інтенсивність сонячної радіації залежить від регіону, пори року і хмарності. За умови ясного неба, загальна середньомісячна сонячна радіація на 1 м^2 для:

- вертикальної поверхні, орієнтованої на південь, становить до 612 МДж/м^2 (м. Київ у березні);

- горизонтальної поверхні до 870 МДж/м^2 (м. Херсон у червні);

За умови середньої хмарності, загальна середньомісячна сонячна радіація на 1 м^2 для:

- вертикальної поверхні, орієнтованої на південний-схід або південний-захід,

становить до 344 МДж/м^2 (м. Одеса у серпні);

- горизонтальної поверхні до 690 МДж/м^2 , (м. Одеса у липні).

Загальний річний обсяг сонячної радіації, який припадає на 1 м^2 поверхні за умови середньої хмарності, для:

- вертикальної поверхні, орієнтованої на південь, становить до 2827 МДж/м^2 (м. Миколаїв), що еквівалентно $785,28\text{ кВт-год/м}^2$ в тепловій енергії;

- горизонтальної поверхні до 4376 МДж/м^2 (м. Миколаїв), що еквівалентно $1215,56\text{ кВт-год/м}^2$ в тепловій енергії.

В нормативних документах зазначено декілька значень внутрішньої нормативної температури для житлових будинків:

- 18°C для житлових будинків, проєктну документацію на нове будівництво або реконструкцію яких затверджено до 1 жовтня 2005 р. [4];

- $20,0^{\circ}\text{C}$ – розрахункове значення температури для житлових будівель [5].

Найбільш детально регламентує вимоги до внутрішньої температури в житлових будівлях ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» [6], визначаючи діапазони результуючої температури для різних типів приміщень з метою забезпечення оптимальних умов мікроклімату:

а) спальня, вітальня, кабінет:

у холодний період $22,0 \pm 2,0$;

у теплий період $24,5 \pm 1,5$;

б) кухня, гардеробна:

у холодний період $19,5 \pm 3,0$;

в) ванна кімната:

у холодний період $25,0 \pm 1,5$;

для б) і в) теплий період не зазначено.

Формування та підтримання внутрішнього мікроклімату, що відповідає санітарно-гігієнічним нормам, досягається шляхом інтегрованої дії огороджувальних конструкцій та інженерних систем. З огляду на це, детальний аналіз сучасних наукових публікацій дозволяє виявити ключові виклики та проблемні аспекти у сфері організаційно-технологічних рішень реконструкції житлових будівель типових

серій та інженерних мереж із урахуванням підвищення рівня їх енергоефективності.

Кривошеєв, Грищенко, Іващенко та Самійленко [7] провели порівняльний аналіз методів розрахунку теплових втрат і теплонадходжень у будівлях, прийнятих у вітчизняній та закордонних нормативних базах. Встановлено, що національні стандарти (ДСТУ) значно відстають від практик ISO, CEN, ASHRAE та CIBSE, зокрема через використання спрощених квазі-стаціонарних методів, які дають суттєву похибку для сучасних енергоефективних будівель. Рекомендовано перехід до динамічних методів (ASHRAE Heat Balance, RTS, CIBSE Admittance, EN ISO 52000) та гармонізацію нормативної бази без національних спрощень. Це сприятиме підвищенню точності розрахунків, ефективнішому використанню енергоресурсів і капіталу, а також конкурентоспроможності вітчизняних проєктів у міжнародному середовищі.

У статті [8] дослідники доходять висновку, що в Україні необхідно оптимізувати систему ТП і наводять основні недоліки систем централізованого ТП:

- необхідність спорудження та експлуатації теплових мереж, яка зумовлює збільшення вартості систем ТП (великі капітальні та експлуатаційні витрати);
- теплові втрати під час транспортування теплоти;
- складність регулювання через велику розгалуженість та протяжність теплових мереж [8].

та переваги децентралізованих систем ТП:

- зниження експлуатаційних витрат (як правило, немає необхідності в обслузі, таким чином, експлуатаційні витрати складають тільки витрати на паливо);
- зниження тепловтрат унаслідок скорочення шляху транспортування теплової енергії;
- можливість більш гнучкого застосування автоматики для контролю і регулювання параметрів роботи системи, що дає ефект енергозбереження;

– мобільність (джерело теплопостачання або всю систему можна переміщати з місця на місце) [8].

У роботі [9] автори аналізують поточний стан і енергетичні втрати централізованої системи ТП у житлово-комунальній сфері, зокрема середні питомі витрати теплової енергії на опалення житлового фонду в Україні оцінюються у 250–600 кВт·год/(м²·рік), що в 3–5 разів більше ніж аналогічні показники для таких країн Північної Європи як Швеція, Норвегія і Фінляндія. Встановлено, що в магістральних мережах ТП температура теплоносія перевищує 140 °С, загальні втрати теплової енергії сягають 35–60 %, «близько 80 % енергоблоків ТЕС та ТЕЦ перевищило межу фізичного зношення у 200 тис. год» [9], зношеність тепломереж перевищує 50 %, це значно відхиляється від нормативного показника у 13 %.

Зінченко, Новіков, Волощук і Штіфзон [10] описали основні характеристики і принципи роботи конденсаційних котлів, які можуть стати основним теплогенеруючим агрегатом в децентралізованій системі автономного ТП, реалізований на рівні окремого багатоквартирного будинку. «ККД конденсаційного котла може сягати 96 %, але він напряду залежить від споживача теплової енергії, а саме від температури зворотного теплоносія. Ефективна робота конденсаційного котла має місце лише при застосуванні низькотемпературних систем теплозабезпечення будинків» [10] і потребує автоматизованої системи керування.

У дослідженні [11] було комплексно обстежено систему опалення навчального корпусу ПДАБА, включаючи тепловізійний аналіз, який виявив інфільтраційні теплові відмови. Ці відмови, що полягають у порушенні герметичності будівлі та надмірному витоку повітря, призводять до порушення мікроклімату, дискомфорту, ризику появи цвілі та підвищених експлуатаційних витрат, хоча й не впливають на міцність конструкцій. Зазначається, що інфільтраційні дефекти, які важко виявити звичайною тепловізійною

зйомкою, потребують проведення Blower Door Test для точного визначення повітропроникності. Запропоновано заходи із термомодернізації системи опалення, що призвели до скорочення питомого енергоспоживання при опаленні будівлі на 43 %, крім того, проведено оцінювання їх економічної доцільності.

Білоус, Суходуб та Крамаренко [12] здійснили комплексну оцінку та енергетичного моделювання будівлі гуртожитку № 5 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Моделювання виконано із застосуванням програмного забезпечення DesignBuilder, що дозволило створити динамічну енергетичну модель об'єкта. Результати початкового аналізу свідчать, що поточний рівень енергоефективності будівлі відповідає класу «В».

Було проаналізовано чотири сценарії підвищення енергоефективності, а саме: термомодернізацію, впровадження систем рекуперації тепла, переривчасті режими роботи систем опалення та охолодження, а також їх поєднання. Результати моделювання показали, що впровадження систем рекуперації дозволяє скоротити річне споживання енергії на опалення до 53 %, тоді як застосування комбінованого підходу забезпечує скорочення на понад 40 %. Також оцінено вплив відновлюваних джерел енергії (сонячні колектори, теплові насоси, котли на біомасі) на енергетичний баланс будівлі. Застосування цих джерел забезпечує до 42 % річного енергоспоживання, значно знижуючи залежність від традиційних енергоресурсів. Встановлено, що комплексна реалізація заходів енергозбереження дозволяє будівлі досягти класу енергоефективності «А» та відповідати концепції будівлі з майже нульовим енергоспоживанням (NZEB) [12].

В експериментальному дослідженні [13] аналізувалася продуктивність охолодження фотоелектричних (ФЕ) панелей із застосуванням методів радіатора та радіатора з тепловим акумулюванням. Додатково було оцінено ефективність та

властивості теплоносіїв для чотирьох фотоелектричних теплових (ФЕТ) колекторів з активним охолодженням. Пасивне охолодження дозволяє знизити температуру ФЕ-елемента на 10 °С, порівняно з неохолоджуваною панеллю, температура якої доходила до 70 °С. Оптимальні результати активного охолодження: ФЕТ-колектор на основі теплових труб, занурений у звичайну воду, показав оптимальний розподіл температури та максимальне зниження температури на 53 % порівняно з найкращою конфігурацією пасивного охолодження. Цей метод захищає ФЕ-панель від перегріву та забезпечує кращу рівномірність розсіювання тепла. Напруга зросла на 13 % порівняно з неохолоджуваною панеллю.

Робота [14] присвячена визначенню економічного ефекту від впровадження заходів енергоефективності житлових приміщень і виходить з того, що існуючі переваги таких заходів (зокрема комфорт та якість повітря) часто недостатні для мотивації домовласників до додаткових витрат.

Представлена методологія має на меті спростити економічний аналіз, враховуючи як прямі (відсотки за іпотекою, зростання цін на паливо), так і непрямі (відсотки за ошадними рахунками, гранична ставка податку) економічні параметри. Також вона бере до уваги термін служби заходів, втрату ефективності та оцінює ринкову вартість на основі майбутньої економії енерговитрат. Кінцеві результати надають домовласнику чітке уявлення про річну чисту економію та чисті активи, що демонструє загальну фінансову вигоду від інвестицій в енергоефективність.

Стаття [15] присвячена обґрунтуванню застосування сучасних програмних комплексів на основі будівельного інформаційного моделювання (Building Information Modeling, BIM) для проєктування енергоефективних будівель. В ній визначаються критерії вибору програмного забезпечення, яке дозволяє інтегровано виконувати моделювання, розрахунок показників енергоефективності,

аналіз теплових мостів, візуалізацію та генерацію робочої документації. Особлива увага приділяється демонстрації високодеталізованих тривимірних моделей, збагачених повною інформацією про теплотехнічні характеристики матеріалів та технічні дані обладнання. Що дозволяє оцінити теплофізичні властивості будівлі на етапі проєктування.

У дослідженні [16] аналізується ефективність BIM як інструменту, що перевершує класичні методи проєктування. BIM дозволяє віртуально підбирати, розробляти та узгоджувати компоненти будівлі, заздалегідь перевіряючи їхню функціональність. Дослідження також проводить порівняльний аналіз енерговитрат будівлі до та після її утеплення за допомогою хмарного програмного забезпечення Insight.

«Числовим та дослідницьким шляхами доведено ефективність застосування дворамних вікон, у результаті чого енергоспоживання будинку зменшилося на 9,1 %. Застосування додаткових вікон дозволяє отримати майже термічно однорідну зовнішню утеплювальну оболонку будинку» [16].

Вілінська, Бурлак і Гурська [17] доходять висновку, що суттєве зниження експлуатаційних витрат на енергоресурси (газ, електроенергія) досягається завдяки комплексному застосуванню енергоефективних рішень, таких як енергоефективні вікна, сонячні колектори, конденсаційні котли та вискоелефективна вентиляція. Ключовим аспектом є інтеграція та використання автоматизованої системи управління «Розумний будинок», яка оптимізує функціонування всіх технічних пристроїв.

Таким чином, особливість формування та підтримки оптимального мікроклімату в багатоквартирних будинках в умовах помірного клімату, характерного для України, полягає у необхідності як активного обігріву в зимовий, так і ефективного охолодження в літній період. Значні добові та сезонні коливання температури зовнішнього повітря, а також

мінливість інсоляції (день/ніч, хмарність) унеможливають використання виключно альтернативних джерел енергії.

На відміну від нового будівництва при реконструкції необхідно враховувати незмінні архітектурно-конструктивні обмеження існуючої будівлі, зокрема:

- а) просторову орієнтацію;
- б) архітектурно-планувальні рішення;
- в) матеріал несучих конструкцій.

Крім того необхідно:

а) оцінити технічний стан і рівень фізичного зносу будівлі і визначити фактичну несучу здатність існуючих будівельних конструкцій;

б) проаналізувати можливості інтеграції нового обладнання, зокрема:

- фасадних систем (вентильовані фасади, штукатурні системи утеплення);
- енергетичного обладнання (котли, теплові насоси, тепло-акумулятори, ФЕ панелі);
- електротехнічної інфраструктури (розподільчі щити, акумуляторні системи).

Водночас, існують значні можливості для суттєвого покращення експлуатаційних показників об'єкта шляхом модернізації:

- теплового контуру – енергоефективні огорожувальні конструкції, утеплення, віконні системи;
- систем ТП та ГВП – скорочення зовнішніх мереж ТП, застосування теплових насосів, конденсаційних котлів, сонячних колекторів;
- системи вентиляції – рекуперация тепла, припливно-витяжні установки з автоматикою.

Крім того, пропонуються наступні організаційно-технологічні рішення реконструкції житлових будівель типових серій та інженерних мереж із урахуванням підвищення рівня їх енергоефективності:

– інтеграція сонячних електричних систем (СЕС) з рідинним охолодженням у конструкції фасаду та покрівлі будівлі. Відібране тепло використати для потреб опалення та ГВП;

– створення додаткової суцільної оболонки будівлі «Будинок в теплиці» з можливістю контрольованого повітряного

обміну, яка захистить від впливу зовнішнього середовища, неконтрольованої інфільтрації, сонячної радіації;

– при теплотехнічному розрахунку нових огорожувальних конструкцій розглядати існуючі будівельні конструкції як акумулятор тепла, не враховуючи їхні початкові теплотехнічні характеристики;

– створення комбінованих децентралізованих систем опалення, що використовують різні типи енергоносіїв (наприклад, природний газ, електрична енергія, біопаливо у вигляді пелет, сонячна теплова енергія), суттєво підвищує стійкість системи підтримки мікроклімату в цілому. Такий підхід надає власникам будівлі можливість в режимі реального часу обирати найбільш економічно вигідний вид палива, враховуючи поточні тарифи, наприклад, використовуючи електропідігрів за нічним тарифом;

– при комплексній модернізації пропонується створення уніфікованих ВІМ для типових серій житлових будинків, що включає:

- вдосконалення методики оцінки несучої здатності, міцності та стійкості, що дозволить визначити придатність до енергоефективної реконструкції за інтегрованою шкалою (наприклад, від 5 балів – повна придатність, до 1 балу – аварійний стан);

- розробку типових проєктів термомодернізації, які не потребуватимуть додаткових узгоджень і можуть бути застосовані у всіх регіонах України та періодично оновлюватимуться з урахуванням новітніх науково-технічних розробок.

Такий підхід дозволить спростити впровадження енергоефективних заходів, скоротити терміни проєктування, чіткий кошторис дозволить точніше прогнозувати витрати та залучати фінансування.

Для об'єктивної оцінки економічної доцільності заходів з термомодернізації, необхідно розробити уніфіковану методику, яка має комплексно враховувати капітальні витрати на впровадження, поточну та прогнозовану вартість енергоносіїв,

очікуваний економічний ефект, вартість кредитних ресурсів та рівень інфляції. Хоча у багатьох наукових дослідженнях визнається ключова роль державної підтримки в сфері енергоефективності, проте визначальним фактором успішного впровадження енергоефективних заходів залишається рішення кінцевого споживача.

Важливо також пам'ятати, що тарифна політика для населення часто формується директивно, а не ринковими механізмами. Цей аспект може суттєво спотворити реальний економічний ефект від проведених енергоефективних реконструкцій.

Концепція «сезонно-добового енергетичного банкінгу» пропонує механізм віртуального кредитування та передбачає обмін надлишкової денної генерації електроенергії з відновлюваних джерел, зокрема СЕС, у літній період на збільшений обсяг енергії для споживання у нічні години зимового періоду, переважно для потреб опалення. Фундаментом цієї концепції є економічний дисбаланс: тоді як витрати на придбання денної «зеленої» генерації є високими, собівартість нічної атомної генерації є значно нижчою, і вона часто є надлишковою в періоди мінімального попиту.

Висновки

Оптимізація енергоефективності багатоквартирних житлових будівель у помірного кліматі України являє собою комплексне завдання, що виходить за межі суто технічних рішень і охоплює фінансові, організаційні та соціальні аспекти. Це потребує розробки уніфікованої методики економічної оцінки, яка комплексно враховуватиме капітальні та експлуатаційні витрати, вартість залученого капіталу, рівень інфляції, а також специфіку державного регулювання тарифів на енергоносії для населення.

Стандартизація проєктних рішень є критично важливою для подолання існуючих викликів енергомодернізації. Використання технологій ВІМ для створення уніфікованих моделей типових будівельних серій, доповнених методиками

оцінки їхньої структурної придатності до реконструкції, дозволить розробити типові проєктні рішення, які будуть позбавлені необхідності додаткових узгоджень і значно спростять процес модернізації, підвищать точність кошторисів та полегшать залучення фінансування.

У будівлях масових серій, завдяки типовим проєктним рішенням та стандартизації елементів, відкриваються значні можливості для уніфікованого застосування стандартизованих компонентів у оздобленні фасадів, системах вентиляції та опалення. Такий підхід забезпечує комплексну оптимізацію процесів проєктування, виробництва та монтажу, спрощує логістику, сприяє зниженню трудовитрат та матеріалоємності, підвищує якість виконаних робіт та прогнозованість експлуатаційних характеристик. Крім того, це прискорює реалізацію проєктів та створює умови для тиражування енергоефективних рішень, що є критично важливим для комплексних програм термомодернізації житлового фонду.

Водночас, існує значний потенціал для покращення експлуатаційних показників об'єктів шляхом системної модернізації теплового контуру, інженерних систем (ТП, ГВП, вентиляції з рекуперацією) та впровадження інноваційних рішень, зокрема інтеграції СЕС з ФЕТ-колекторами, створення додаткових захисних оболонок будівель та розробки комбінованих децентралізованих систем опалення з різними енергоносіями.

Перспективним фінансовим інструментом, що здатен активізувати участь споживачів у балансуванні енергосистеми, є концепція «сезонно-добового енергетичного банкінгу». Вона передбачає механізм віртуального кредитування, який базується на обміні надлишкової денної генерації електроенергії з відновлюваних джерел у літній період на збільшений обсяг енергії для споживання у нічні години зимового періоду. Це рішення є економічно обґрунтованим завдяки значному дисбалансу між високою вартістю

придбання денної «зеленої» генерації та низькою собівартістю надлишкової нічної атомної генерації.

Запропоновані комплексні заходи та рішення щодо модернізації житлових будівель матимуть значний і багатогранний позитивний вплив. Вони покращать умови проживання та сприятимуть зниженню залежності від традиційних енергоресурсів, що забезпечить їхню довгострокову економічну ефективність.

Термомодернізація безпосередньо зменшує викиди парникових газів за рахунок скорочення споживання теплової енергії. Це також підсилює енергетичну безпеку, стимулює економіку завдяки скороченню витрат для населення та створенню нових робочих місць.

Без впровадження ефективних заходів у багатоквартирних будинках, виконання Україною зобов'язань за NDC 2.0 в рамках Паризької угоди неможливе.

Впровадження комплексної енергомодернізації житлових будівель, хоч і обіцяє значні переваги, стикається з низкою викликів. Основною перешкодою є високі початкові капіталовкладення та складність інтеграції різнорідних систем, що потребує залучення висококваліфікованих фахівців. Економічний ефект може бути нівельований директивною тарифною політикою держави, а залучення фінансування залежить від доступності кредитів.

Неодноразово в наукових дослідженнях підкреслюється, що державна підтримка є вирішальною в галузі енергоефективності, проте успіх впровадження енергоефективних заходів залежить від кінцевого споживача.

Крім того, організаційні та соціальні бар'єри, такі як необхідність узгодження рішень між багатьма власниками та тимчасові незручності для мешканців, можуть ускладнити реалізацію проєктів. До того ж, деякі інноваційні рішення потребують додаткових досліджень для підтвердження їх надійності та довговічності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Nationally Determined Contributions Registry UNFCCC. URL: <https://unfccc.int/NDCREG> (дата звернення: 14.05.2025).
2. Global Status Report for Buildings and Construction 2024-2025 : Key Messages. 2025. URL: <https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/47261> (дата звернення: 21.05.2025).
3. ДБНУ. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_27_2010/5-1-0-929 (дата звернення: 21.05.2025).
4. Кабінет міністрів України, Постанова № 127 від 02/06/2024. Деякі питання здійснення перерахунку вартості комунальних послуг за період їх ненадання, надання не в повному обсязі або невідповідної якості. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/127-2024-%D0%BF> (дата звернення: 21.05.2025).
5. ДБНУ. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-13> (дата звернення: 21.05.2025).
6. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1018> (дата звернення: 21.05.2025).
7. Кривошеєв М. О., Грищенко Р. В., Іващенко Н. В., Самійленко С. М. Методи розрахунку теплових втрат і теплонадходжень в будівлях. Огляд, нормативні вимоги і практичні підходи в Україні та світі. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2024. Т. 60, № 1. С. 53–69. DOI: 10.15673/ret.v60i1.2897.
8. Солод Л. В., Березюк Г. Г., Адегов О. В., Ткачова В. В. Системний підхід до вирішення проблем підвищення енергоефективності систем тепlopостачання. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 6. С. 99–105. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.271222.99.916.
9. Сердюк В. Р., Сердюк Т. В., Бауман К. В. Актуальність реновації застарілих внутріквартирних теплових мереж. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2022. Т. 32, № 1. С. 63–72. DOI: 10.31649/2311-1429-2022-1-63-72.
10. Зінченко Д. Д., Новіков П. В., Волошук В. А., Штіфзон О. Й. Розробка моделі конденсаційного котла на основі методів машинного навчання для побудови цифрового двійника. *Таврійський науковий вісник. Серія : Технічні науки*. 2024. № 2. С. 28–45. DOI: 10.32782/tnv-tech.2024.2.3.
11. Косенко Л. В., Коваль О. О., Юрченко Є. Л., Тимошенко О. А. Енергоефективність системи опалення висотного корпусу ПДАБА. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 6. С. 66–72. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.271222.66.912.
12. Білоус І. Ю., Суходуб І. О., Крамаренко С. О. Оцінювання енергетичної ефективності житлових будівель сучасної забудови при впровадженні комплексу енергозберігаючих заходів по покращенню теплозахисних властивостей огорожень та використанню відновлювальних джерел енергії. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2024. Т. 60, № 4. С. 283–296. DOI: 10.15673/ret.v60i4.3053.
13. Al-Amri Fahad, Maatallah Taher S., Al-Amri Omar F., Ali Sajid, Ali Sadaqat, Ateeq Ijlal Shahruxh, Zachariah Richu, Kayed Tarek S. Innovative technique for achieving uniform temperatures across solar panels using heat pipes and liquid immersion cooling in the harsh climate in the Kingdom of Saudi Arabia. *Alexandria Engineering Journal*. 2022. Т. 61, № 2. С. 1413–1424. DOI: 10.1016/j.aej.2021.06.046.
14. Fumo Nelson, Crawford Roy. A Homeowner-Based Methodology for Economic Analysis of Energy-Efficiency Measures in Residences. *Open Journal of Energy Efficiency*. 2013. Т. 2, № 2. С. 97–106. DOI: 10.4236/ojee.2013.22013.
15. Назаренко О., Бейнер Н., Бейнер П. Комплексний підхід до проектування енергоефективних будівель на основі BIM. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 1 (013). С. 66–73. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280223.66.920.
16. Сопільняк А. М., Колохов В. В., Ярова Т. П., Серeda С. Ю., Сіренко К. О., Дунда В. В. BIM-енергоаналіз будинку з подвійними вікнами. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2021. № 3. С. 107–115. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.010721.107.773.
17. Вілінська Л. М., Бурлак Г. М., Гурська А. В. Енергоефективність багатоквартирного житлового будинку. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 3 (015). С. 28–33. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.140723.28.951.

REFERENCES

1. Nationally Determined Contributions Registry UNFCCC. URL: <https://unfccc.int/NDCREG> (data zvernennia: 14.05.2025). (in Ukrainian).
2. Global Status Report for Buildings and Construction 2024–2025: Key Messages. 2025. URL: <https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/47261> (data zvernennia: 21.05.2025).
3. *DBNU. DSTU-N B V.1.1-27:2010 Budivelna klimatohiia* [DBNU. DSTU-N B V.1.1-27:2010 Building climatology]. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_27_2010/5-1-0-929 (data zvernennia: 21.05.2025). (in Ukrainian).

4. *Kabinet Ministriv Ukrainy. Postanova № 127 vid 02.06.2024. Deiaki pytannia zdiisnennia pererakhunku vartosti komunalnykh posluh* [Cabinet of Ministers of Ukraine, Resolution no. 127 of 02/06/2024. Some issues of recalculating the cost of utility services for the period of their non-provision, incomplete provision or inadequate quality]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/127-2024-п> (data zvernennia: 21.05.2025). (in Ukrainian).
5. *DBNU. DBN V.2.6-31:2021. Teplova izoliatsiia ta enerhoefektyvnist budivel* [DBNU. DBN V.2.6-31:2021 Thermal insulation and energy efficiency of buildings]. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-13> (data zvernennia: 21.05.2025). (in Ukrainian).
6. *DBNU. DBN V.2.5-67:2013. Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsionuvannia* [DBN V.2.5-67:2013. Heating, ventilation and air conditioning]. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1018> (data zvernennia: 21.05.2025). (in Ukrainian).
7. Kryvosheiev M.O., Hryshchenko R.V., Ivashchenko N.V. and Samiilenko S.M. *Metody rozrakhunku teplovykh vtrat i teplonadkhozhen v budivliakh. Ohlyad, normatyvni vymohy i praktychni pidkhody v Ukraini ta sviti* [Methods for calculating heat losses and heat gains in buildings. Overview, regulatory requirements and practical approaches in Ukraine and the world]. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2024, vol. 60, no. 1, pp. 53–69. DOI: 10.15673/ret.v60i1.2897. (in Ukrainian).
8. Solod L.V., Bereziuk H.H., Adehov O.V. and Tkachova V.V. *Systemnyi pidkhid do vyrishennia problem pidvyschennia enerhoefektyvnosti system teplopostachannia* [A systematic approach to solving problems of increasing the energy efficiency of heat supply systems]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2022, no. 6, pp. 99–105. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.271222.99.916. (in Ukrainian).
9. Serdiuk V.R., Serdiuk T.V. and Bauman K.V. *Aktualnist renovatsii zastarylykh vnutrikvartalnykh teplovykh merezh* [The relevance of renovation of outdated intra-district heating networks]. *Suchasni tekhnologii, materialy i konstruksii v budivnytstvi* [Modern Technologies, Materials and Structures in Construction]. 2022, vol. 32, no. 1, pp. 63–72. DOI: 10.31649/2311-1429-2022-1-63-72. (in Ukrainian).
10. Zinchenko D.D., Novikov P.V., Voloshchuk V.A. and Shtifzov O.I. *Rozrobka modeli kondensatsiinoho kotla na osnovi metodiv mashynnoho navchannia dlia pobudovy tsyfrovoho dviinyka* [Development of a condensing boiler model based on machine learning methods for building a digital twin]. *Tavriyskyi naukovyi visnyk. Seriya : Tekhnichni nauky* [Tavria Scientific Bulletin. Series : Technical Sciences]. 2024, no. 2, pp. 28–45. DOI: 10.32782/tnv-tech.2024.2.3. (in Ukrainian).
11. Kosenko L.V., Koval O.O., Yurchenko Ye.L. and Tymoshenko O.A. *Enerhoefektyvnist systemy opalennia vysochnoho korpusu PDABA* [Energy efficiency of the heating system of the high-rise building of the PDABA]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2022, no. 6, pp. 66–72. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.271222.66.912. (in Ukrainian).
12. Bilous Iu.Yu., Sukhodub I.O. and Kramarenko S.O. *Otsiniuvannia enerhetychnoi efektyvnosti zhytlovykh budivel suchasnoi zabulovy* [Assessment of the energy efficiency of modern residential buildings when implementing a set of energy-saving measures to improve the thermal insulation properties of enclosures and the use of renewable energy sources]. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2024, vol. 60, no. 4, pp. 283–296. DOI: 10.15673/ret.v60i4.3053. (in Ukrainian).
13. Al-Amri F., Maatallah T.S., Al-Amri O.F., Ali S., Ali S., Ateeq I.S., Zachariah R. and Kayed T.S. *Innovative technique for achieving uniform temperatures across solar panels using heat pipes and liquid immersion cooling in the harsh climate in the Kingdom of Saudi Arabia*. *Alexandria Engineering Journal*. 2022, vol. 61, no. 2, pp. 1413–1424. DOI: 10.1016/j.aej.2021.06.046.
14. Fumo N. and Crawford R.A. *Homeowner-Based Methodology for Economic Analysis of Energy-Efficiency Measures in Residences*. *Open Journal of Energy Efficiency*. 2013, vol. 2, no. 2, pp. 97–106. DOI: 10.4236/ojee.2013.22013.
15. Nazarenko O., Beiner N. and Beiner P. *Kompleksnyi pidkhid do proektuvannia enerhoefektyvnykh budivel na osnovi BIM* [A comprehensive approach to designing energy-efficient buildings based on BIM]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 1 (013), pp. 66–73. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.280223.66.920. (in Ukrainian).
16. Sopilniak A.M., Kolokhov V.V., Yarova T.P., Sereda S.Yu., Sirenok K.O. and Dunda V.V. *BIM-enerhoanaliz budynku z podviinymy viknamy* [BIM energy analysis of a house with double windows]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2021, no 3, pp. 107–115. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.010721.107.773. (in Ukrainian).
17. Vilinska L.M., Burlak H.M. and Hurska A.V. *Enerhoefektyvnist bahatokvartyrnoho zhytloвого budynku* [Energy efficiency of a multi-apartment residential building]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 3 (015), pp. 28–33. DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.140723.28.951. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 20.06.2025.

УДК 691.735:620.193.28

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.241225.99.1213

ПОРІВНЯЛЬНА КОРОЗИЙНА СТІЙКІСТЬ БРОНЗ У ВОДНОМУ РОЗЧИНІ ХЛОРИСТОГО ЗАЛІЗА

КІМСТАЧ Т. В.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
БІЛИЙ О. П.², канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна; відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 567-85-61, e-mail: 1375tatjana@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8993-201X

² Кафедра ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. + 38 (067) 984-84-99, e-mail: haplitvo@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1234-5404

Анотація. Корозія – проблема світового рівня, яка супроводжує будь які металеві і окремі неметалеві вироби. Мідь та її сплави – це сучасні конструкційні матеріали які також не позбавлені проблем корозії, хоча і характеризуються підвищеними антикорозійними властивостями в багатьох середовищах та умовах експлуатації виробів з них. Найбільш небезпечним, з точки зору корозії бронз, є рідкі середовища з кислотними властивостями. На сьогодні інформація про стійкість бронз в рідких середовищах з кислотними властивостями, зокрема у водному розчині хлористого заліза, має фрагментарний характер і тому потребує подальших досліджень, які дозволять розширити уявлення щодо процесів які супроводжують корозію бронз в кислотних середовищах різної природи та їх наслідків. **Мета дослідження.** Визначити придатність використання бронз в водному розчині хлористого заліза за величиною їх відносної швидкості корозії. **Результати досліджень.** Встановлено, що багатокомпонентність досліджуваних бронз, різноманітність ступені їх легування, різноманітність розчинності продуктів хімічних перетворень у воді та послідовність проходження хімічних перетворень під час електрохімічної корозії досліджуваних алюмінієвих бронз являє собою процес в результаті якого продукти хімічної взаємодії на поверхні зразків, вірогідно, розташовуються пошарово, порушуючи при цьому суцільність шарів і, відповідно, не забезпечуючи надійний захист поверхні бронз від корозії в обраному для іспитів середовищі. Всі досліджені в роботі бронзи не є корозійностійкими в 5 %-му водному розчині FeCl₃. При цьому, з числа досліджених бронз найменшу відносну швидкість корозії (1,00) має олов'яна бронза БрО6Ц6С3, найбільшу – алюмінієві бронзи, зокрема, відносна швидкість корозії бронзи БрА9Ж3Л досягає (2,26). Бронза БрА7К5О1,5Мц0,3Л до та після термічної обробки має відносну швидкість корозії від (1,61) до (1,96). В той же час, відносна швидкість корозії бронзи БрА10Ж4Н4 складає (2,09). Залежності синергетичного впливу хімічного складу бронзи БрА7К5О1,5Мц0,3Л на швидкість її корозії не виявлено. Бронзові вироби без відповідного захисту їх поверхонь недоцільно застосовувати для роботи в середовищі водних розчинів хлористого заліза в довгостроковій перспективі. У разі неможливості виконання поверхневого захисного шару для роботи в середовищі водних розчинів хлористого заліза в короткостроковій перспективі бронзові вироби доцільно виготовляти з олов'яної бронзи. **Наукова новизна** роботи полягає в подальшому розвитку уявлень щодо корозії бронз в кислотних середовищах, зокрема у водному розчині хлористого заліза. **Практичне значення.** Використання результатів роботи дозволить прийняти обґрунтоване рішення щодо можливості та доцільності використання виробів з бронзи, які будуть працювати або вже працюють в середовищі водних розчинів хлористого заліза без захисного покриття їх поверхонь. Врахування отриманої в роботі інформації дозволить розробникам нової техніки прийняти оптимальне рішення щодо використання бронзових деталей, спрогнозувати міжремонтні строки роботи вузлів та агрегатів у складі яких бронзові вироби контактують з водними розчинами хлористого заліза, що в сукупності дозволить уникнути аварійних ситуацій при використанні такої техніки.

Ключові слова: бронза; швидкість корозії; олово; алюміній; хлористе залізо

COMPARATIVE CORROSION RESISTANCE OF BRONZE IN AN AQUEOUS SOLUTION OF FERRIC CHLORIDE

KIMSTACH T.V.^{1*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
BILYI O.P.², Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

^{1*} Department of Material Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine; Department of Problems of Deformation and Thermal Treatment of Structural Steel, Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of National Academy of Science of Ukraine, 1, Ak. Starodubov K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (097) 567-85-61, e-mail: 1375tatyana@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8993-201X

² Department of Casting Production, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., 49010, Dnipro, Ukraine, tel. + 38 (067) 984-84-99, e-mail: baplitvo@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1234-5404

Abstract. Corrosion is a global problem that accompanies any metal and some non-metallic products. Copper and its alloys are modern structural materials that are also not free from corrosion problems, although they are characterized by increased anti-corrosion properties in many environments and operating conditions of products made of them. The most dangerous, from the point of view of corrosion of bronzes, are liquid environments with acidic properties. Today, information on the stability of bronzes in liquid environments with acidic properties, in particular in an aqueous solution of ferric chloride, is fragmentary nature and therefore requires further research, which will allow expanding the understanding of the processes that accompany the corrosion of bronzes in acidic environments of various nature and their consequences. **Purpose of the study.** To determine the suitability of bronzes for use in an aqueous solution of ferric chloride by the magnitude of their relative corrosion rate. **Research results.** It was established that the multicomponent nature of the studied bronzes, the diversity of the degree of their alloying, the diversity of the solubility of the products of chemical transformations in water and the sequence of chemical transformations during electrochemical corrosion of the studied aluminum bronzes is a process as a result of which the products of chemical interaction on the surface of the samples are likely to be arranged in layers, thereby violating the continuity of the layers and, accordingly, not providing reliable protection of the bronze surface from corrosion in the environment selected for the tests. All bronzes studied in the work are not corrosion-resistant in a 5 % aqueous solution of FeCl₃. At the same time, among the studied bronzes, tin bronze BrO₆C₆S₃ has the lowest relative corrosion rate (1.00), aluminum bronzes have the highest, in particular, the relative corrosion rate of bronze BrA₉Zh₃L reaches (2.26). Bronze BrA₇K₅O_{1.5}Mts_{0.3}L before and after heat treatment has a relative corrosion rate from (1.61) to (1.96). At the same time, the relative corrosion rate of bronze BrA₁₀Zh₄N₄ is (2.09). The dependence of the synergistic effect of the chemical composition of bronze BrA₇K₅O_{1.5}Mts_{0.3}L on its corrosion rate has not been revealed. Bronze products without appropriate protection of their surfaces are inappropriate for use in the environment of aqueous solutions of ferric chloride in the long term. In the event that it is impossible to perform a surface protective layer for operation in an environment of aqueous ferric chloride solutions in the short term, it is advisable to manufacture bronze products from tin bronze. **The scientific novelty** of the work lies in the further development of ideas about the corrosion of bronzes in acidic environments, in particular in an aqueous ferric chloride solution. **Practical significance.** The use of the results of the work will allow making a reasoned decision on the possibility and expediency of using bronze products that will operate or are already operating in an environment of aqueous ferric chloride solutions without a protective coating of their surfaces. Taking into account the information obtained in the work will allow developers of new equipment to make the optimal decision regarding the use of bronze parts, to predict the terms between overhauls works components and assemblies in which bronze products come into contact with aqueous solutions of ferric chloride, which in combination will allow avoiding emergency situations when using such equipment.

Keywords: *bronze; corrosion rate; tin; aluminum; ferric chloride*

Вступ. Корозія – світова проблема, яка супроводжує будь де і будь які вироби з будь яких конструкційних матеріалів від бетону до металів та їх сплавів. Мідь та її сплави – одні з найпоширеніших матеріалів, які не позбавлені корозійних проблем. Мідь і бронзи використовують для виготовлення архітектурних елементів, художнього монументального лиття, прикрас, елементів побутової техніки, деталей промислового призначення, електротехніки, приладів, інструментів тощо [1–3]. Різноманітність областей застосування виробів з міді та її сплавів нерозривно пов'язана з різноманітністю умов роботи таких деталей

та, відповідно, з характером та інтенсивністю їх корозійного руйнування.

Зокрема, деталі з бронзи можуть працювати в умовах статичних та динамічних навантажень, в умовах тертя, ковзання, абразивного зносу, кавітації, ерозії, високого тиску та вакууму, контактуючи з газовим та/або рідким водним середовищем, водневий показник якого становить рН = 1...13, з органічними матеріалами природного та техногенного походження, морською та прісною водою тощо.

Найбільшою мірою вироби з міді та мідних сплавів схильні до корозії в середовищах з кислотними властивостями,

природа виникнення яких може бути як техногенною, так і природною. Найбільшими техногенними джерелами кислотних забруднень, що призводять до появи кислотних дощів та стоків, є вугільні теплові електростанції, автомобілі, промислові підприємства [4; 5]. Зокрема, кислотних властивостей звичайний дощ набуває при виділення в повітря сірководня з шлаку доменних печей в грануляційному басейні, оксиду сірки при спалюванні вугілля, під час виготовлення коксу тощо.

Води з кислотними властивостями супроводжують видобуток вугілля, руди та інших мінералів. За даними І. Монгайта зі співробітниками (1978) обсяг стічних (шахтних) вод, наприклад, при видобутку 1 т кам'яного вугілля становить від 2 до 20 м³. При цьому, виходячи з того, що деякі шахтні води мають величину рН ≤ 6,5, то неконтрольований дренаж кислих шахтних вод (дренаж кислих порід) являє собою суттєву довгострокову небезпеку для ґрунту, людей, біосфери тощо.

Оскільки вироби з міді та її сплавів безпосередньо контактують з такими кислими середовищами забезпечуючи надійну роботу обладнання для, зокрема, проведення безперервного керованого дренажного відводу шахтних та кар'єрних вод для знесолення або їх пом'якшення содово-вапняним методом (нейтралізації), то вирішення проблеми підвищення корозійної стійкості деталей з міді та її сплавів є актуальним завданням.

Стан питання. Вироби з міді та багатьох її сплавів, що знаходяться на повітрі, від протікання на їх поверхнях активної корозії захищає патина – тонкий шар продуктів корозії міді зеленуватого кольору [6]. Сам по собі процес формування патини на поверхні міді та її сплавів природним шляхом досить тривалий. Тому, для захисту таких виробів патинування здійснюють штучним шляхом. Зокрема, з цією метою на поверхні бронзових виробів створюють шар штучної сульфатної патини, наприклад, шляхом занурення бронзового виробу у водний розчин CuSO₄ на 500 годин [7].

За даними [7] внутрішній шар такої штучної патини, що контактує безпосередньо з бронзовим виробом, складається із щільного шару куприту (Cu₂O) на поверхні якого розташовано шар кристалів брошантиту – Cu₄SO₄(OH)₆. Витримка бронзи з такою штучною патиною в імітованому кислотному дощі з величиною водневого показника рН = 3,1 свідчить про те, що з часом відбувається деградація патини і, відповідно, її захисна ефективність знижується.

Захисні властивості штучної патини за умов імітованого кислотного дощу у Гонконгу було досліджено авторами роботи [8] на бронзі UNS C90300 (Cu – 88 %, Sn – 8 %, Zn – 4 %, Ni – 1 %). Встановлено, що природний шар патини, що виник на бронзі, в основному, складається з куприту і не забезпечує бронзі високий корозійний захист. При цьому співвідношення Sn і Zn у продуктах корозії (у природній патині) менше, ніж у самій бронзі. У той же час, штучна патина на поверхні бронзи, навіть через 30 днів випробувань, забезпечує бронзі високу стійкість проти корозії.

Для виробів з олов'яної бронзи, що знаходяться на відкритому повітрі, схильних до впливу кислотних дощів, але не мають ніякого зовнішнього механічного впливу, ефективним захистом є обробка її поверхні інгібіторами корозії, зокрема, 1-Н бензімідазолом [9]. Для захисту від корозії в рідких кислих середовищах деталі чистої міді також попередньо обробляють інгібіторами. Як такі інгібітори, наприклад, використовують 5-бензиліден-2,4-діоксотетрагідро-1,3-тіазол і (БДТ) або 5-(4'-ізопропілбензиліден)-2,4-діоксотетрагідро-1,3-тіазол (ШБДТ) [10].

Описані вище способи підвищення корозійної стійкості міді та бронз здебільшого придатні для виготовлення деталей з олов'яних бронз архітектурного або художнього призначення. Деталі технічного призначення, в основному, виготовляють із алюмінієвих бронз, які виявляють високі корозійні властивості навіть у ряді середовищ із кислотними

властивостями [11], про що свідчить аналіз даних таблиці 1.

За даними J. Sullivan та L. Wong L. (1985), наявність в алюмінієвій бронзі такого плівкоутворювального компонента, як алюміній, сприяє формуванню на поверхні бронзи двох шарів плівкових оксидів. При цьому зовнішній шар

переважно складається з оксиду міді (Cu_2O), внутрішній – з оксиду алюмінію (Al_2O_3). На думку J. Sullivan та L. Wong L. (1985), саме цей захисний шар на поверхні алюмінієвої бронзи і сприяє її стійкості проти корозії у багатьох середовищах, оскільки він не дозволяє кисню вільно проникати до поверхні бронзи.

Таблиця 1

Хімічна стійкість мідних сплавів [12]

Речовина, яка розчинена у воді	Масовий вміст у розчині, %	t, °C	Марка мідних сплавів за класифікацією ASTM (позначення в Україні)		
			C93200 (БрО7Ц3С7Н1)	C95400 (БрА11Ж4Н1,5Мц)	C86300 (БрА6Ц19Ж3Мц3)
HCl	5	20	–	0	–
HF	5	20	0	0	–
HNO ₃	5	20	–	–	–
H ₂ SO ₄	5	20	0	+	–
H ₃ PO ₄	5	20	0	0	–
CH ₃ COOH	5	20	–	0	–
CH ₂ O ₂	5	20	–	+	–
H ₃ BO ₃	5	20	–	+	–
C ₆ H ₈ O ₇	5	20	–	+	–
NH ₃	10	20	–	–	–
NaNO ₃	5	20	0	+	0
KNO ₃	5	20	0	+	0
NH ₄ NO ₃			–	–	–
CaCl ₂			+	+	+
MgCl ₂			+	+	+
MgSO ₄			+	+	+
NaCl			+	+	+
NaNO ₃			+	+	+
ZnCl ₂			–	0	–
ZnSO ₄			0	0	0
Вода			+	+	0
Вода морська			0	+	–

Примітка: **+** – сплав стійкий до корозії; **0** – стійкість сплаву до корозії залежить від конструкції виробу, вмісту кисню у воді, температури тощо; **–** – сплав не стійкий до корозії

В роботі [13] наведено результати визначення швидкості корозії однофазної алюмінієвої бронзи БрА8 у водних розчинах H₂SO₄, HCl, NaCl та NaOH різної концентрації. Встановлено, що досліджувана алюмінієва бронза найбільш схильна до корозії в середовищах з кислотними властивостями, ніж у морській воді та середовищах з лужними властивостями, що, на думку Н. Vohni (2000), в середовищах з кислотними властивостями обумовлено сильним агресивним впливом сульфідних та хлоридних іонів на руйнування пасивної плівки. Швидкість корозії алюмінієвої бронзи дещо знижується у часі, але

залишається незмінною для всіх використаних в роботі концентрацій NaCl (в морській воді) і NaOH (в лужних середовищах), тоді як у кислих середовищах (HCl, H₂SO₄) вона неухильно зростає. При цьому швидкість корозії алюмінієвої бронзи зростає зі збільшенням концентрації хімічних реагентів у середовищі з кислотними властивостями, але знижується в морській воді та середовищі з лужними властивостями [13].

З даних роботи [14] відомо, що литі бронзи не стійкі до корозії у водних розчинах FeCl₃ і FeSO₄. Така висока хімічна активність, зокрема водного розчину FeCl₃, пов'язана: по-перше, з дисоціацією хлористого заліза яка

супроводжується виникненням у воді сірчаної кислоти за реакцією:



що надає кислотного характеру розчину хлористого заліза у воді; по-друге, за даними [15], з високою окислювальною здатністю іонів Fe^{3+} завдяки чому швидкість корозії бронзи буде тим вище, чим більше концентрація у воді FeCl_3 – іона-окислювача Fe^{3+} .

Термодинамічна нестійкість у певному середовищі за певних умов експлуатації, що викликає спонтанний перехід матеріалу виробу до більш стійкого окисленого (іонного) стану з відповідним зменшенням термодинамічного потенціалу системи є головною причиною будь якої електрохімічної корозії виробів з металів і сплавів.

Принципову можливість протікання такого спонтанного хімічного процесу визначають знаком зміни термодинамічного (ізобарно-ізотермічного) потенціалу (енергії Гіббса – ΔG) – характеристичної функції стану системи, зменшення якої в зворотному процесі за сталих значень тиску P і температури T дорівнює максимальній корисній роботі. Будь які спонтанні процеси супроводжуються зменшенням ізобарно-ізотермічного потенціалу. Виходячи з цього, за даних умов процес корозії є можливим, якщо $\Delta G < 0$, і неможливим, якщо $\Delta G > 0$. При $\Delta G = 0$ система перебуває в рівновазі [16].

Різниця в хімічному та фазовому складі бронз за інших рівних умов, також певним чином впливає на їх ізобарно-ізотермічний потенціал i , відповідно, на стійкість до корозії (див. табл. 1) навіть у такому агресивному середовищі як водний розчин FeCl_3 . Тим не менше на сьогодні відомості щодо швидкості корозії більшості бронз у водному розчині FeCl_3 відсутні. Відсутність таких даних унеможливорює проведення раціонального вибору бронз для виробів, що будуть працювати у такому чи подібному середовищі.

Мета дослідження. Визначити придатність використання бронз в водному розчині хлористого заліза за величиною їх відносної швидкості корозії.

Методика досліджень. Дослідження проводили на зразках бронз марок БрА10Ж4Н4, БрА9Ж3Л, БрО6Ц6С3, БрО5А1 та БрА7К2О1,5Мц0,3.

Плавку бронз проводили під шаром деревного вугілля в графітовому тиглі (металоемність тигля за міддю 15 кг) індукційної печі з використанням первинних шихтових матеріалів (Cu, Si, Al, Mn, Sn, Ni, Zn, Pb та сталі Ст3) технічної чистоти. Хімічний склад бронз визначали на прецизійному аналізаторі EXPERT 4L.

Зразки у вигляді шайб $\varnothing 40 \times 10$ мм виготовляли механічною обробкою зі злитків $\varnothing 50 \times 190$ мм які були відлиті в піщано-рідкоскляні ливарні форми. Схема вирізки зразків зі злитку представлена на рисунку 1.

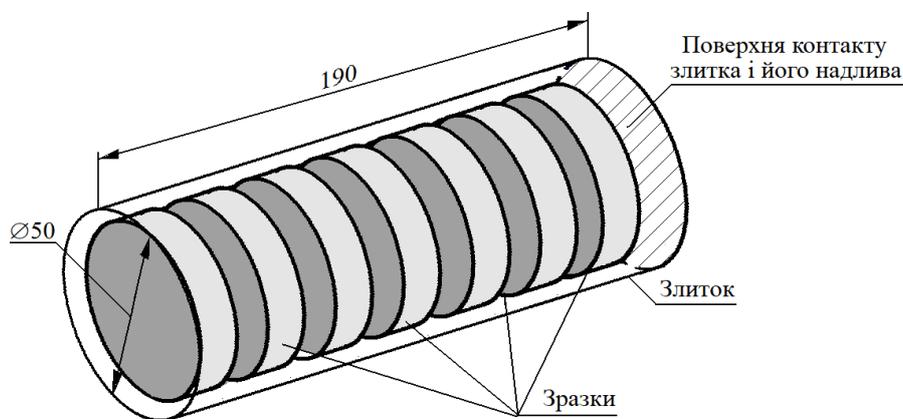


Рис. 1. Схема вирізки зразків зі злитку

Для опису комплексного впливу легуючих елементів бронзи

БрА7К2О1,5Мц0,3 до корозійної стійкості прийняли безрозмірний критерій K_R , який є співвідношенням наступного виду [17]:

$$K_R = \left(1 - \frac{nn}{100}\right) \cdot \frac{Al-Si-Mn}{(1+Sn)^2}, \quad (2)$$

де nn , Al , Si , Sn , Mn – масовий вміст небажаних домішок, алюмінію, кремнію, олова та марганцю у бронзі відповідно, %; 100 – балансова константа.

В дослідженнях використовували литі та литі термічно оброблені зразки бронзи БрА7К2О1,5Мц0,3 з величиною $K_R = 0,34$; 0,57 і 0,77. Термообробку зразків бронзи БрА7К2О1,5Мц0,3 проводили в лабораторній муфельній печі опору за режимом:

- нагрівання до 760 ± 10 °С, ізотермічна витримка за цієї температури протягом 40 хвилин, загартування у воді з температурою 20 °С;

- старіння при 300 ± 5 °С впродовж 60 хвилин з послідуочим охолодженням на повітрі.

Розміри зразків виміряли штангенциркулем з точністю 0,01 мм. Масу зразків виміряли зважуванням на аналітичних вагах при кімнатній температурі та на електронних вагах з точністю 0,1 г. Температуру розчину виміряли спиртовим термометром типу ТТЖ. Величину водневого показника розчину визначали за кольоровою шкалою на універсальному лакмусовому папері.

Щільність зразків розраховували за результатами їх гідростатичного зважування в дистильованій воді при 20 °С, використовуючи формулу, $г/см^3$:

$$\rho = \frac{m_{п}}{m_{п} - m_{в}}, \quad (3)$$

де $m_{п}$, $m_{в}$ – маса зразка на повітрі та дистильованій воді відповідно, г.

Для досліджень корозійної стійкості в якості середовища з кислотними властивостями було обрано 5 % водний розчин $FeCl_3$. Під час іспитів зразки бронз занурювали в 5 % водний розчин $FeCl_3$ на 1 добу (24 години). Після витримки у розчині зразки витягали з розчину, промивали в проточній прісній воді і ультразвуковим очищенням з поверхні зразків видаляли залишки продуктів хімічних реакцій. Очищені зразки висушували на повітрі за $100...110$ °С впродовж 6 годин і повторно зважували.

Швидкість корозії зразків розраховували за формулою:

$$W = \Delta m / (S \cdot \rho), \quad (4)$$

де Δm – зміна маси бронзового зразка за добу, г; S – площа поверхні зразка, $см^2$; ρ – щільність зразка, $г/см^3$.

Термодинамічне моделювання проводили з метою визначення величини змін енергії Гіббса в інтервалі температур $0...200$ °С з використанням програми HSC Chemistry 5.1.

Результати досліджень. Результати визначення хімічного складу досліджуваних бронз та розрахунку величини K_R , приведено в таблиці 2. Результати розрахунку щільності зразків досліджуваних бронз за формулою (3) приведено в таблиці 3. Вигляд очищених поверхонь зразків бронз після їх знаходження в 5 % водному розчині $FeCl_3$ при 20 °С впродовж доби (24 годин) представлено на рисунку 2.

Таблиця 2

Хімічний склад досліджуваних бронз та величини K_R для бронз БрА7К2О1,5Мц0,3

Марка бронзи	Масовий вміст хімічних елементів у бронзах, %										K_R
	Cu	Al	Si	Mn	Sn	Fe	Ni	Zn	Pb	nn	
БрА10Ж4Н4	81,683	10,05				3,98	3,95			0,337	
БрА9Ж3Л	87,506	9,12				3,07				0,304	
БрО6Ц6С3	84,555				5,97			6,05	3	0,425	
БрО5А	93,588	0,96			5,14					0,312	
БрА7К2О1,5Мц0,3	88,600	7,42	1,67	0,400	1,64					0,270	0,77
	89,500	6,40	1,62	0,382	1,76					0,338	0,57
	88,520	6,21	2,48	0,211	2,19					0,390	0,34

Щільність зразків досліджуваних бронз

Марка бронзи	БрА10Ж4Н4	БрА9Ж3Л	БрО6Ц6С3	БрО5А	БрА7К2О1,5Мц0,3					
K_R	–	–	–	–	0,34	0,57	0,77	0,34	0,57	0,77
Термічна обробка	–	–	–	–	–			Т/О		
Щільність, г/см ³	7,30	7,50	8,75	8,81	7,68	7,72	7,70	7,68	7,72	7,70

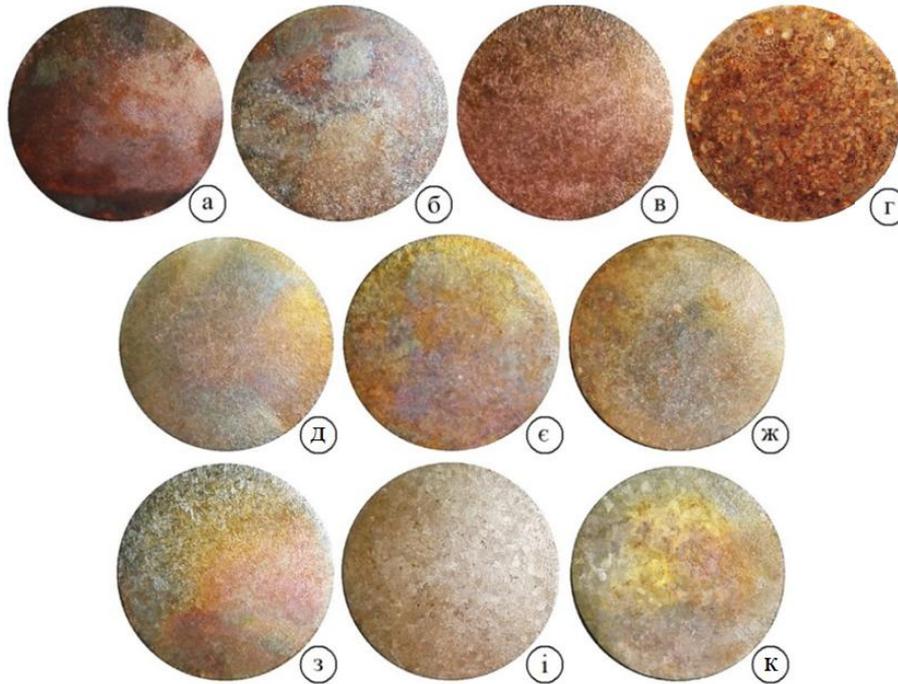


Рис. 2. Вигляд очищених зразків після їх знаходження в 5 % водному розчині $FeCl_3$ при 20 °С впродовж доби (24 години): БрА10Ж4Н4 (а), БрА9Ж3Л (б), БрО6Ц6С3 (в), БрО5А (г), БрА7К2О1,5Мц0,3 з $K_R = 0,34$ (д), БрА7К2О1,5Мц0,3 з $K_R = 0,57$ (е), БрА7К2О1,5Мц0,3 з $K_R = 0,77$ (ж), БрА7К2О1,5Мц0,3 з $K_R = 0,34$ і т/о (з), БрА7К2О1,5Мц0,3 з $K_R = 0,57$ і т/о (і), БрА7К2О1,5Мц0,3 з $K_R = 0,77$ і т/о (к)

За результатом візуального огляду досліджуваних зразків бронз встановлено, що на їх поверхні в першу годину іспитів в невеликій кількості виникали газові бульбашки і за 24 години іспитів на поверхні зразків з'явився світло-жовтий в'язкий за консистенцією шар продуктів хімічної реакції між компонентами бронз та хлорним залізом. На повітрі, після завершення витримки зразків у розчині цей шар з часом набував світло коричневого кольору. Оскільки хімічна корозія є наслідком прямої хімічної взаємодії між бронзою та середовищем яке її оточує, то при цьому електричний струм не утворюється і продукти корозії більшою частиною

залишаються на поверхні бронзи, які і було виявлено по завершенню іспитів зразків досліджуваних бронз.

Після видалення шару продуктів реакції з поверхонь, досліджувані зразки бронз сушили, зважували та, відповідно до прийнятої методики, розраховували добову швидкість їх корозії (товщину шару бронз яку вони втратили за добу) при їх знаходженні в 5 % водному розчині $FeCl_3$ при 20 °С. Результати розрахунків швидкості корозії бронз приведено в таблиці 4, а гістограма результатів розрахунку представлена на рисунку 3.

Таблиця 4

Добова швидкість непов'язаної корозії бронз в 5% водному розчині FeCl₃

Швидкість корозії бронзи (W), мм/доба									
БрА10Ж4Н4Л	БрА9Ж3Л	БрО6Ц6С3	БрО5А	БрА7К5О1,5Мц0,3Л					
				до т/о			після т/о		
				K _R = 0,34	K _R = 0,57	K _R = 0,77	K _R = 0,34	K _R = 0,57	K _R = 0,77
0,048	0,052	0,023	0,029	0,041	0,044	0,043	0,044	0,045	0,037

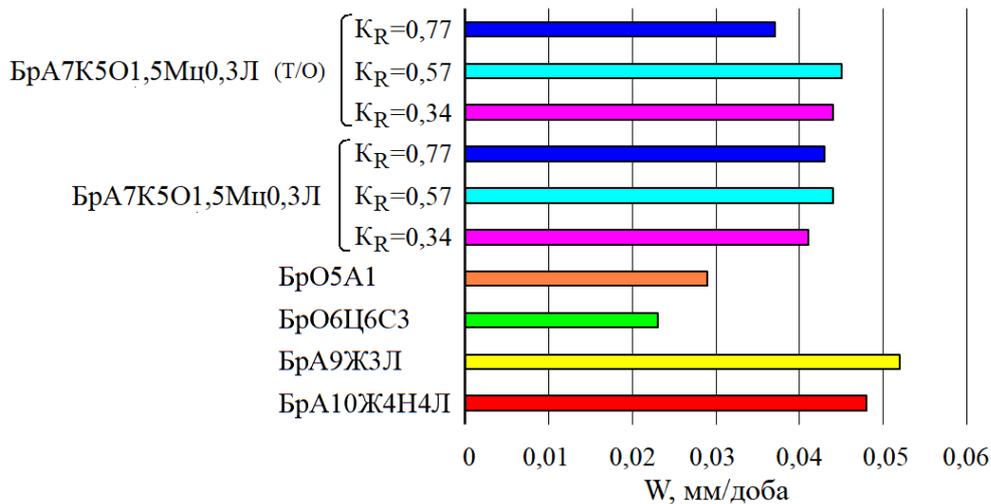


Рис. 3. Гістограма швидкості корозії зразків бронз при їх знаходженні в 5% стоячому водному розчині FeCl₃ за 20 °C впродовж доби

Таблиця 5

Відносна швидкість корозії бронз

Бронза	БрА10Ж4Н4	БрА9Ж3Л	БрО6Ц6С3	БрО5А	БрА7К5О1,5Мц0,3Л					
					до т/о			після т/о		
					K _R = 0,34	K _R = 0,57	K _R = 0,77	K _R = 0,34	K _R = 0,57	K _R = 0,77
W _B	2,09	2,26	1,00	1,26	1,78	1,91	1,87	1,91	1,96	1,61

Відносна (відносно бронзи БрО6Ц6С3) швидкість корозії досліджуваних бронз (W_B) приведена в таблиці 5.

З аналізу отриманих результатів витікає, що всі досліджені бронзи не є корозійно-стійкими в середовищі з кислотними (рН = 2) властивостями в якості якого був прийнятий 5% водний розчин хлористого заліза. При цьому, з числа досліджених бронз найменшу швидкість корозії має олов'яна бронза БрО6Ц6С3, найбільшу – БрА9Ж3Л. Залежності швидкості корозії від

величини критерію K_R та термічної обробки БрА7К5О1,5Мц0,3Л не встановлено.

Виходячи з результатів проведених досліджень припустили, що з точки зору швидкості корозії бронз в 5% водному розчині FeCl₃ вирішальним є вміст олова та алюмінію. Виходячи з цього побудували залежність між величиною відносною швидкістю корозії бронз W_B та співвідношенням масового вмісту олова до алюмінію в досліджуваних термічно не оброблених бронзах, яке має вигляд:

$$S_A = (1 + Sn) / (1 + Al), \quad (5)$$

де Sn, Al – масовий вміст олова та алюмінію в бронзі відповідно, %.

Результати розрахунку величин співвідношення S_A за формулою (5) та

відповідні величини W_B для досліджуваних бронх приведено в таблиці 6.

Таблиця 6

Величини співвідношення S_A та величини W_B

Бронза	БрА10Ж4Н4	БрА9Ж3Л	БрО6Ц6С3	БрО5А	БрА7К5О1,5Мц0,3Л		
					$K_R = 0,34$	$K_R = 0,57$	$K_R = 0,77$
W_B	2,09	2,26	1,00	1,26	1,78	1,91	1,87
S_A	0,09	0,10	6,97	3,13	0,44	0,37	0,31

Залежність відносної швидкості корозії від величини співвідношення S_A для досліджуваних бронх за даними таблиці 6 представлена на рисунку 4.

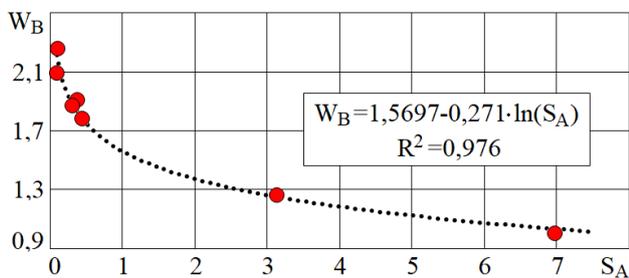
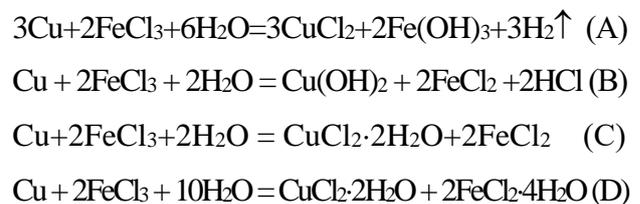


Рис. 4. Залежність відносної швидкості корозії від величини співвідношення S_A

З аналізу ходу залежності на рисунку 4 витікає, що кислотостійкість бронз зростає з підвищенням в них вмісту олова та зменшення вмісту алюмінію. При цьому, екстраполяція залежності на рисунку 4 в бік підвищення величини S_A свідчить, що навіть при відсутності алюмінію в складі бронзи і підвищенню вмісту олова в ній до 10 % за

масою швидкість корозії бронзи в 5 % водному розчині $FeCl_3$ зменшиться незначно.

Вірогідно, що шар продуктів корозії на поверхні бронзових зразків є сумішшю неорганічних сполук, що побічно підтверджують результати виконаного термодинамічного моделювання. Тобто, оскільки основним хімічним елементом бронз є мідь, то термодинамічне моделювання проводили для наступних хімічних реакцій:



Результати термодинамічного моделювання за реакціями (A)...(D) приведено в таблиці 7 та представлено на рисунку 5.

Таблиця 7

Величини ΔG для хімічних реакцій (A)...(D) за результатами термодинамічного моделювання

t, °C	ΔG , Дж/моль			
	Реакція А	Реакція В	Реакція С	Реакція D
0	151,028	-9,05	-108,32	-65,99
50	145,433	-20,142	-105,053	-47,359
100	141,201	-30,587	-100,056	-28,799
150	138,044	-40,464	-93,521	-10,281
200	135,802	-49,837	-85,602	8,21

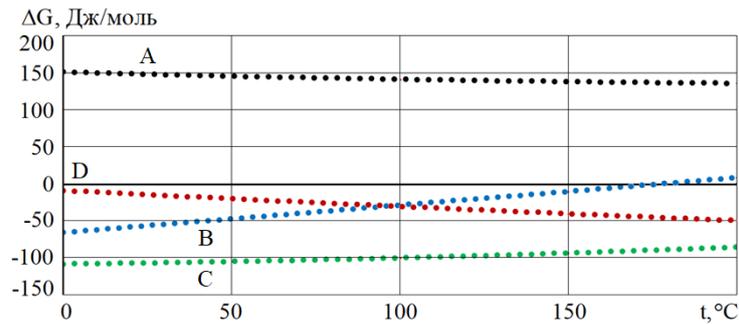
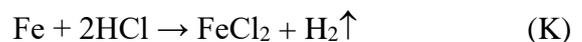
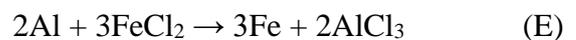


Рис. 5. Залежності зміни енергії Гіббса від температури для реакцій А, В, С, D

З аналізу даних таблиці 7 та ходу залежностей на рисунку 5 витікає, що за умов проведення корозійних іспитів проходження реакції (А) неможливе оскільки енергія Гіббса в усьому обраному діапазоні змін температур (від 0 до 200 °С) має надатну величину.

З числа реакцій (В), (С) і (D) найбільш вірогідним є проходження реакції (С) оскільки з цих трьох реакцій реакція (С) має найменшу від’ємну величину ΔG. Для бронз у складі яких присутній алюміній з виникненням за реакцією (С) двохлористого

заліза FeCl₂ при наявності води також можливе проходження наступних хімічних реакцій:



Результати термодинамічного моделювання за реакціями (E)...(M) приведено в таблиці 8 та представлено на рисунку 6.

Таблиця 8

Величини ΔG для хімічних реакцій (E)...(M) за результатами термодинамічного моделювання

t, °C	ΔG, Дж/моль			
	Реакція E	Реакція F	Реакція K	Реакція M
0	-357,2	-109,9	-115,1	-922,3
50	-350,6	-107,3	-149,8	-883,0
120	-346,0	-104,5	-97,1	-844,1
160	-339,1	-102,7	-91,3	-818,5
200	-335,6	-100,3	-85,6	-793,1

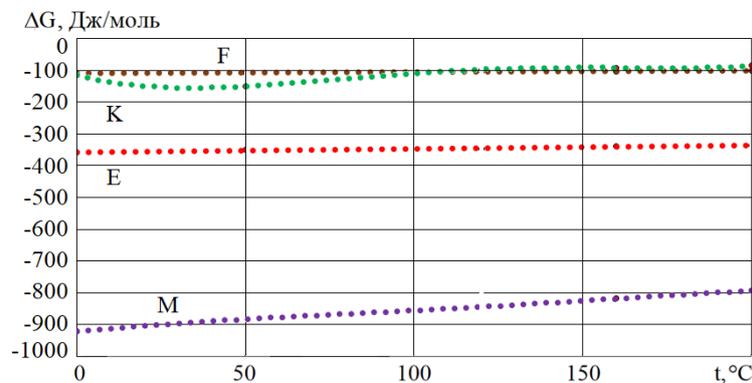
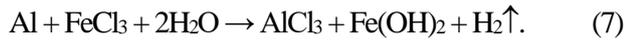


Рис. 6. Залежності зміни енергії Гіббса від температури для реакцій E, F, K, M

З аналізу даних таблиць 7 та 8, результатів візуального оцінювання

проходження процесу корозії зразків витікає, що найбільш ймовірними продуктами корозії досліджуваних бронз є

суміш $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, FeCl_2 , AlCl_3 , $\text{Al}(\text{OH})_3$ та HCl . При цьому хлориди алюмінію (III) та заліза (II) у воді можуть гідролізуватися з виникненням кристалогідратів $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ та $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ відповідно. Алюміній на поверхні бронзи також може реагувати з хлоридом міді (II) та хлоридом заліза (III) за реакціями:



В цілому, перелічені вище можливі хімічні реакції дозволяють припустити реалізацію електрохімічної корозії алюмінієвих бронз за наступним механізмом. Мідь з бронзи реагує з хлористим залізом за реакцією (С) з виникненням двохлористої міді. В той же час, одним з продуктів хімічних реакцій (В) і (F) є соляна кислота. Вірогідно, що водний розчин соляної кислоти з двохлористою міддю буде взаємодіяти з міддю бронзи. В процесі проходження цієї хімічної реакції концентрація іонів виникаючої двовалентної міді в шарі продуктів реакції, що контактує з поверхнею бронзи, зменшується, а, відповідно, концентрація іонів, що містять одновалентну мідь, в ньому збільшується. При цьому, в міру зменшення концентрації іонів двовалентної міді швидкість розчинення міді в бронзі буде сповільнюватися, але тільки в тому випадку, якщо до фронту проходження даних перетворень не буде надходити кисень. При проникненні з водного розчину кисню до поверхні бронзи концентрація іонів двовалентної міді знову буде зростати і розчинення міді в бронзі триватиме.

Якщо хімічна корозія алюмінієвої бронзи триває за цим механізмом, то швидкість зростання маси продуктів корозії алюмінієвих бронз повинна безперервно підвищуватися в часі у разі наявності контакту водного розчину хлористого заліза з повітрям. В разі відсутності такого контакту з повітрям швидкість зростання маси продуктів корозії алюмінієвих бронз повинна підвищуватися на початку контакту бронзи з водним розчином хлористого заліза, а через деякий час знизитись

практично до нуля. Тобто, в останньому випадку, хімічна корозія бронзи в водному розчині хлористого заліза повинна зупинитись.

З викладеного витікає, що шар продуктів реакції на поверхні алюмінієвих бронз формується за результатом проходження численних хімічних реакцій та виникнення різноманітних за фізичними властивостями та об'ємом речовин. В свою чергу, такий циклічно-последовний характер формування шарів продуктів хімічних взаємодій, вочевидь, не сприяє його суцільності та, відповідно, захисту поверхні бронз від контакту з водним розчином хлористого заліза та розчиненого в ньому кисню.

Відповідно до хімічного складу використаної в дослідженнях олов'яної бронзи під час корозії на її поверхні виникає шар продуктів хімічної взаємодії у складі якого не тільки $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, але і з'єднання її легуючих компонентів з хлором, що можуть виникати за наступними хімічними реакціями:



На відміну від алюмінієвих бронз виникнення продуктів хімічної взаємодії легуючих компонентів олов'яної бронзи з розчином хлористого заліза не супроводжується появою значної кількості соляної кислоти. Вірогідно, що ця особливість формування шару продуктів хімічних реакцій на поверхні олов'яної бронзи надає йому більшої щільності ніж шару на алюмінієвих бронзах, що і зменшує швидкість її корозії.

Висновки

З результатів проведених досліджень витікає, що:

1 – результатом різноманітності і ступеню легування досліджуваних бронз, різниці в розчинності продуктів хімічних перетворень у воді, последовності і численності хімічних перетворень під час корозії досліджуваних бронз в обраному для

іспитів середовищі, є порушення суцільності захисного шару на бронзах, що, відповідно, не забезпечує надійного захисту бронз від корозії;

2 – всі досліджені бронзи не є корозійно-стійкими в 5 %-му водному розчині FeCl₃;

3 – кислотостійкість бронз зростає з підвищенням в них вмісту олова та зменшення вмісту алюмінію;

4 – з числа досліджених бронз найменшу відносну швидкість корозії $W_B=1,00$ має олов'яна бронза БрОЦ6С3, найбільшу – алюмінієві бронзи, зокрема, у бронзи БрА9Ж3Л $W_B = 2,26$;

5 – бронза БрА7К5О1,5Мц0,3Л до та після термічної обробки має відносну

швидкість корозії від 1,61 до 1,96, в той же час, відносна швидкість корозії стандартизованої в багатьох країнах світу морської бронзи БрА10Ж4Н4 складає 2,09;

6 – бронзові вироби без відповідного захисту їх поверхонь недоцільно застосовувати для роботи в середовищі водних розчинів хлористого заліза в довгостроковій перспективі;

7 – в разі неможливості виконання поверхневого захисного шару для роботи в середовищі водних розчинів хлористого заліза в короткостроковій перспективі бронзові вироби доцільно виготовляти з олов'яної бронзи яка не містить алюмінію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Copper and copper alloys ed. by D. J. R, ASM International. Handbook Committee. Materials Park, OH : ASM International, 2001. 652 p.
2. Copper & copper alloys : Composition and properties. Potters Bar : Copper Development Association, 1986.
3. Official Site of Copper Development Association, Inc. (USA). *Official Site of Copper Development Association, Inc. (USA)*. URL: <http://www.copper.org> (date of access: 01.05.2025).
4. Gorham E. Acid deposition and its ecological effects: a brief history of research. *Environmental Science & Policy*. 1998. Vol. 1, № 3. Pp. 153–166. URL: [https://doi.org/10.1016/s1462-9011\(98\)00025-2](https://doi.org/10.1016/s1462-9011(98)00025-2)
5. Sedyaw P. et al. A review on acid rain it's causes, effects and management measures. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CREATIVE RESEARCH THOUGHTS – IJCRT (IJCRT)*. 2024. Vol. 12, № 4. Pp. 959–968. URL: https://www.researchgate.net/publication/380355523_A_REVIEW_ON_ACID_RAIN_IT'S_CAUSES_EFFECT_S_AND_MANAGEMENT_MEASURES#fullTextFileContent
6. Hedberg Y., Wallinder I. O. Protective Green Patinas on Copper in Outdoor Constructions. *Journal of Environmental Protection*. 2011. Vol. 02, № 07. Pp. 956–959. URL: <https://doi.org/10.4236/jep.2011.27109>
7. Mao Y., Nie D., Mombello D. Chemical and electrochemical characterization of artificial sulphate patina on bronze. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed*. 2014. Vol. 29, № 3. Pp. 585–589. URL: <https://doi.org/10.1007/s11595-014-0961-0>
8. Zhou Z. et al. Corrosion evolution of UNS C90300 bronze in simulated acid rain of Hong Kong. *Surface and Interface Analysis*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1002/sia.7086>
9. Marušić K., Čurković H. O., Takenouti H. Corrosion Inhibition of Bronze and Its Patina Exposed to Acid Rain. *Journal of The Electrochemical Society*. 2013. Vol. 160, № 8. Pp. 356–363. URL: <https://doi.org/10.1149/2.063308jes>
10. Vastag G. et al. New inhibitors for copper corrosion. *De Gruyter Brill*. URL: https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1351/pac200173121861/html?srsId=AfmBOoqXTLIrrUt1Xz_e8Wt3KuNhZmEuLHEcbgMRcXeempWEgf9Vrc8T (date of access: 07.05.2025).
11. Advantages of Aluminum Bronze in acidic environments. *AMPCO Academy*. URL: <https://academy.ampcometal.com/advantages-of-aluminum-bronze-in-acidic-environment> (date of access: 05.05.2025).
12. Bronze Alloy Chemical Resistance Chart – National Bronze Manufacturing. *National Bronze Manufacturing*. URL: <https://www.nationalbronze.com/News/bronze-alloy-chemical-resistance-chart/> (date of access: 11.05.2025).
13. Corrosion Behaviour of Alpha Phase Aluminium Bronze Alloy in Selected Environments. *LEJPT – Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*. URL: http://lejpt.academicdirect.org/A24/get_hm.php?htm=113_125 (date of access: 11.05.2025).
14. *Acess Benelux NL – Specialist in snelkoppelingen*. URL: https://www.aces.nl/dbdocs/file_1.pdf (date of access: 03.05.2025).
15. Єгорова Л. М. Оптимізація процесу хімічного травлення сплава БрБ2. *Вісник Харківського національного університету*. 2014. № 1136. Серія : Хімія. Вип. 24 (47). С. 112–117. URL: http://chembull.univer.kharkov.ua/archiv/2014_2/13.pdf

16. Olasunkanmi O. L. Corrosion : Favoured, Yet Undesirable – Its Kinetics and Thermodynamics. *Corrosion [Working Title]*. 2021. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.98545>
17. Kimstach T. V., Uzlov K. I. Chemical composition influence on mechanical properties of Cu–Al–Si–Sn–Mn system bronze during its solidification in die mold. *System Technologies*. 2025. Vol. 2, № 157. Pp. 135–145. URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-2-157-2025-14>

REFERENCES

1. Copper and copper alloys ed. by D. J. R, ASM International. Handbook Committee. Materials Park, OH : ASM International, 2001, 652 p.
2. Copper & copper alloys : Composition and properties. Potters Bar : Copper Development Association, 1986.
3. Official Site of Copper Development Association, Inc. (USA). Official Site of Copper Development Association, Inc. (USA). URL: <http://www.copper.org> (date of access: 01.05.2025).
4. Gorham E. Acid deposition and its ecological effects: a brief history of research. *Environmental Science & Policy*. 1998, vol. 1, no. 3, pp. 153–166. URL: [https://doi.org/10.1016/s1462-9011\(98\)00025-2](https://doi.org/10.1016/s1462-9011(98)00025-2)
5. Sedyaaaw P. et al. A review on acid rain it's causes, effects and management measures. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CREATIVE RESEARCH THOUGHTS – IJCRT (IJCRT)*. 2024, vol. 12, no. 4, pp. 959–968. URL: https://www.researchgate.net/publication/380355523_A_REVIEW_ON_ACID_RAIN_IT'S_CAUSES_EFFECTS_AND_MANAGEMENT_MEASURES#fullTextFileContent
6. Hedberg Y. and Wallinder I.O. Protective Green Patinas on Copper in Outdoor Constructions. *Journal of Environmental Protection*. 2011, vol. 02, no. 07, pp. 956–959. URL: <https://doi.org/10.4236/jep.2011.27109>
7. Mao Y., Nie D. and Mombello D. Chemical and electrochemical characterization of artificial sulphate patina on bronze. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* 2014, vol. 29, no. 3, pp. 585–589. URL: <https://doi.org/10.1007/s11595-014-0961-0>
8. Zhou Z. et al. Corrosion evolution of UNS C90300 bronze in simulated acid rain of Hong Kong. *Surface and Interface Analysis*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1002/sia.7086>
9. Marušić K., Čurković H. O. and Takenouti H. Corrosion Inhibition of Bronze and Its Patina Exposed to Acid Rain. *Journal of The Electrochemical Society*. 2013, vol. 160, no. 8, pp. 356–363. URL: <https://doi.org/10.1149/2.063308jes>
10. Vastag G. et al. New inhibitors for copper corrosion. De Gruyter Brill. URL: https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1351/pac200173121861/html?srsltid=AfmBOoqXTLIrrUt1Xz_e8Wt3KuNhZmEuLHEcbgMRcXeem pWEgf9Vrc8T (date of access: 07.05.2025).
11. Advantages of Aluminum Bronze in acidic environments. AMPCO Academy. URL: <https://academy.ampcometal.com/advantages-of-aluminum-bronze-in-acidic-environment> (date of access: 05.05.2025).
12. Bronze Alloy Chemical Resistance Chart – National Bronze Manufacturing. National Bronze Manufacturing. URL: <https://www.nationalbronze.com/News/bronze-alloy-chemical-resistance-chart/> (date of access: 11.05.2025).
13. Corrosion Behaviour of Alpha Phase Aluminium Bronze Alloy in Selected Environments. *LEJPT – Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*. URL: http://lejpt.academicdirect.org/A24/get_hm.php?htm=113_125 (date of access: 11.05.2025).
14. ACESS Benelux NL – Specialist in snelkoppelingen. URL: https://www.aces.nl/dbdocs/file_1.pdf (date of access: 03.05.2025).
15. Yehorova L.M. *Optymizatsiia protsesu khimichnoho travlennia splava BrB2* [Optimization of the chemical etching process of BrB2 alloy.]. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu. Seriya : Khimiia* [Bulletin of Kharkiv National University. Series : Chemistry]. 2014, no. 1136, vol. 24 (47), pp. 112–117. URL: http://chembull.univer.kharkov.ua/archiv/2014_2/13.pdf (in Ukrainian).
16. Olasunkanmi O.L. Corrosion : Favoured, Yet Undesirable – Its Kinetics and Thermodynamics. *Corrosion [Working Title]*. 2021. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.98545>
17. Kimstach T.V. and Uzlov K.I. Chemical composition influence on mechanical properties of Cu–Al–Si–Sn–Mn system bronze during its solidification in die mold. *System Technologies*. 2025, vol. 2, no. 157, pp. 135–145. URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-2-157-2025-14>

Надійшла до редакції: 12.08.2025.

УДК 69.001.5:004.89:005.8

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.241225.112.1214

ПЕРСПЕКТИВИ ОПТИМІЗАЦІЇ БУДІВНИЦТВА ДОСТУПНОГО ЖИТЛА В УМОВАХ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ГАЛУЗІ

КРАВЧУНОВСЬКА Т. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*

БОРОДІН М. О.^{2*}, *канд. техн. наук, доц.*

ОСТАПЮК М. О.³, *маг.*

¹ Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-33-66, e-mail: kts789d@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0986-8995

^{2*} Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 724-96-31, e-mail: borodin.maksym@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0513-3876

³ Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (096) 446-60-91, e-mail: 19036.ostapyuk@365.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0009-0004-3597-7628

Анотація. У статті досліджуються сучасні тенденції та виклики, пов'язані з оптимізацією будівництва доступного житла в Україні в умовах глобальної цифрової трансформації будівельної галузі. З огляду на потребу у повоєнному відновленні, обмеження енергоресурсів, дефіцит трудових ресурсів і зростання вартості матеріалів, проблема забезпечення населення якісним і водночас економічно доступним житлом набула особливої актуальності. Особливу увагу приділено потенціалу цифрових технологій – інформаційного моделювання будівель (BIM), систем штучного інтелекту (AI), хмарних платформ управління даними та інтегрованої аналітики – для підвищення ефективності будівельних процесів і обґрунтованості управлінських рішень. Незважаючи на загально визнану актуальність цих інструментів у світовій практиці, результати дослідження засвідчили їх обмежене застосування в українських реаліях. За допомогою методу колективного експертного оцінювання визначено та проранжовано шістьнадцять ключових факторів, що впливають на вибір організаційно-технологічних рішень при реалізації проєктів доступного житла. Встановлено, що найбільший вплив мають саме економічні та ресурсні чинники: вартість матеріалів, витрати на робочу силу, логістика та енергоспоживання. Натомість цифрові технології – зокрема BIM та AI – були оцінені експертами як такі, що мають мінімальний вплив на прийняття практичних рішень. Цей розрив між теоретичним потенціалом цифрових інструментів і їх реальним впливом свідчить про наявність системних бар'єрів: недостатній рівень цифрової грамотності учасників будівництва, нестача кваліфікованих BIM-фахівців, висока вартість впровадження та слабка інтеграція цифрових стандартів у нормативну базу України. У статті наголошується на необхідності комплексної підтримки цифрової трансформації галузі шляхом розвитку освітніх програм, реалізації пілотних проєктів та оновлення галузевих регламентів. Отримані результати можуть бути використані девелоперами, фахівцями з управління будівництвом, а також органами державної влади під час формування стратегій повоєнного відновлення та житлової політики.

Ключові слова: *доступне житло; цифровізація; BIM-технології; організаційно-технологічні рішення; штучний інтелект; будівництво; оптимізація; експертне оцінювання*

PROSPECTS FOR OPTIMIZING AFFORDABLE HOUSING CONSTRUCTION IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATION OF THE INDUSTRY

KRAVCHUNOVSKA T.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

BORODIN M.O.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

OSTAPUK M.O.³, *Stud.*

¹ Department of Organisation and Management in Construction, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.+38 (056) 756-33-66, e-mail: kts789d@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0986-8995

^{2*} Department of Organisation and Management in Construction, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 724-96-31, e-mail: borodin.maksym@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0513-3876

³ Department of Organisation and Management in Construction, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (096) 446-60-91, e-mail: 19036.ostapyuk@365.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0009-0004-3597-7628

Abstract. This article examines current trends and challenges in optimizing affordable housing construction in Ukraine amid the global digital transformation of the construction industry. In light of post-war recovery, energy resource constraints, labor shortages, and rising material costs, the issue of delivering low-cost, high-quality housing has become a key national priority. The implementation of innovative organizational and technological approaches is becoming increasingly important for addressing these challenges effectively. Particular attention is given to the potential of digital technologies – including Building Information Modeling (BIM), artificial intelligence (AI), cloud-based platforms, and integrated construction analytics – in streamlining construction processes and improving decision-making. Despite their global relevance and successful implementation in international practice, the study reveals that these tools are currently underutilized in the Ukrainian context. Using a method of collective expert evaluation, the authors identified and ranked sixteen key factors influencing the selection of organizational and technological solutions in affordable housing projects. The findings demonstrate that the most influential factors remain predominantly economic and resource-related: cost of materials, labor expenses, logistics, and energy consumption. In contrast, digitalization tools, particularly BIM and AI, were rated as having minimal impact on decision-making processes. This gap between the high theoretical potential of digital tools and their limited practical impact reflects a number of systemic challenges, including insufficient digital literacy among stakeholders, lack of qualified BIM specialists, cost of implementation, and weak integration of digital standards into Ukrainian regulatory frameworks. The study emphasizes the need for systemic support of digital transformation through educational programs, pilot projects, and modernization of industry standards. The results may be useful for developers, policy-makers, and construction professionals involved in post-war reconstruction and sustainable housing strategies.

Keywords: *affordable housing; digitalization; BIM technologies; organizational and technological solutions; artificial intelligence; construction; optimization; expert evaluation*

Постановка проблеми та її актуальність. Проблема забезпечення населення доступним житлом залишається однією з найгостріших соціально-економічних викликів для України, особливо в умовах післявоєнного відновлення, інфляційного тиску, міграційних процесів та дефіциту житлового фонду. Традиційні організаційно-технологічні рішення в будівництві виявляються малоефективними через зростаючі ціни на будматеріали, енергоресурси, нестабільність логістичних ланцюгів і кадрові втрати.

У цьому контексті особливої актуальності набуває пошук і впровадження інноваційних підходів до управління будівництвом житла, які здатні забезпечити зниження вартості, скорочення тривалості будівництва, підвищення якості та передбачуваності проєктів. Світова практика доводить ефективність цифрових технологій – таких як інформаційне моделювання будівель (BIM), системи штучного інтелекту, хмарні платформи управління даними, інтернет речей (IoT) – у досягненні цих цілей [4; 5; 7].

Значною мірою від впровадження таких технологій залежить здатність будівельної галузі оперативно реагувати на потреби

ринку та державні програми з відновлення та розвитку житлової інфраструктури. Водночас в Україні бракує системного узагальнення та практичної адаптації цих інструментів до локальних умов, з урахуванням специфіки ресурсів, нормативної бази та соціальних запитів.

Актуальність дослідження полягає в необхідності наукового обґрунтування ефективних організаційно-технологічних рішень для будівництва доступного житла з урахуванням новітніх технологій та сучасного інструментарію цифрового управління. Запропонований підхід дозволяє сформулювати основу для оптимізації девелоперських проєктів і створення нових стратегій у сфері житлового будівництва.

Метою статті є аналіз інноваційних організаційно-технологічних підходів до будівництва доступного житла з урахуванням впровадження BIM-технологій, AI та автоматизованих систем управління.

Завдання дослідження:

- виявити ключові напрямки цифрової трансформації будівництва;
- визначити фактори, що впливають на вибір технологічних рішень;
- оцінити ступінь їх значущості методом експертного ранжування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемі формування та обґрунтування раціональних ресурсозберігальних організаційно-технологічних рішень будівництва цивільних будівель присвячено наукові праці А. І. Білоконя, Д. Ф. Гончаренка, В. І. Доненка, Е. К. Завадскаса, В. М. Кірнос, О. М. Лівінського, О. І. Менейлюка, О. М. Пшінька, І. А. Соколова, В. І. Торкатюка, О. А. Тугая, В. К. Черненко, І. В. Шумакова, Л. М. Шутенка та інших учених.

Завданню забезпечення надійності та безпечної експлуатації існуючого житлового фонду присвячено праці В. І. Большакова, В. О. Галушко, М. М. Дьоміна, А. Д. Єсипенко, В. Р. Млодецького, О. Ф. Осипова, А. В. Радкевича, М. В. Савицького, С. В. Шатова та інших дослідників.

Питання підвищення інвестиційної привабливості житлового будівництва досліджували В. Ю. Божанова, В. Т. Вечеров, В. О. Поколенко, В. І. Торкатюк, Р. Б. Тян, С. А. Ушацький та інші.

Проведений аналіз наукової літератури свідчить про активне дослідження цього питання в контексті сучасних викликів та потреб. Цим питанням в контексті в тому числі і цифрової трансформації галузі займалися також такі науковці, як Кравчуновська Т. С., Большаков В. І. Броневицький С. П., Заяць Є. І. та інші [2; 3].

Виклад основного матеріалу дослідження. В статті використані матеріали магістерської кваліфікаційної роботи Остаюка М. О. [6]. Сучасне будівництво доступного житла потребує переосмислення традиційних організаційно-технологічних рішень та впровадження нових підходів до планування, управління та реалізації будівельних проєктів. За умов обмеженості ресурсів, зростаючої вартості матеріалів і енергоносіїв, а також вимог до швидкості та якості будівництва, виникає потреба в таких рішеннях, які б дозволили підвищити ефективність використання

наявних ресурсів, скоротити витрати, зменшити ризики та підвищити передбачуваність результатів.

Інноваційні методи управління будівництвом охоплюють цілу низку напрямів. Це, зокрема, використання цифрових інструментів, автоматизованих систем аналітики й контролю, хмарних платформ для зберігання та спільної роботи з даними, а також впровадження інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Сукупність таких підходів формує нову парадигму управління будівельними процесами.

В першу чергу хочеться відмітити такі нові технології, як BIM-технології, використання штучного інтелекту та хмарні ресурси. Це безперечно ті шляхи, які дозволяють підвищити доступність житла для широких верств населення за рахунок здешевлення в першу чергу організаційних аспектів реалізації девелоперських проєктів в цілому.

Як вже було сказано, BIM-технології відіграють ключову роль у сучасному будівництві, забезпечуючи комплексне управління будівельним проєктом на всіх етапах життєвого циклу будівлі. Хмарні платформи дозволяють зберігати всі проєктні дані у єдиній системі, забезпечуючи доступність інформації для всіх учасників проєкту. Штучний інтелект у будівництві використовується для прогнозування ризиків, оптимізації витрат та автоматизації процесів. Використання сучасних цифрових технологій дозволяє автоматично перевіряти якість робіт та відповідність будівельним нормам.

Не менш важливо те, що будівництво включає складну логістику матеріалів, обладнання та персоналу і використання спеціалізованих програм дозволяє оптимізувати ці процеси. Все це разом наближає будівництво житла до показників доступного.

В таблиці 1 приведені нові підходи до організації та управлінні процесами будівництва доступного житла в контексті розвитку BIM-технологій та залучення штучного інтелекту.

Нові підходи до організації та управління процесами будівництва доступного житла

Перспективний напрямок	Підходи	Пояснення	Приклад	
1	2	3	4	
Цифровізація управління будівництвом	Використання BIM (Building Information Modeling) у процесах управління	Зниження помилок у проєктуванні та будівництві	У Європі використання BIM знижує витрати на 10–20 % за рахунок більш точного планування та скорочення переробок	
		Оптимізація використання матеріалів		
		Спрощення управління кошторисами та бюджетом		
	Використання хмарних технологій та IoT (Internet of Things)	Підвищення узгодженості між усіма учасниками процесу (інженери, архітектори, будівельники, замовники)	Датчики для контролю стану конструкцій у реальному часі	Використання IoT у будівництві в США дозволяє скоротити час простою техніки на 20 % та зменшити кількість аварійних ситуацій
		Автоматизований моніторинг матеріалів та обладнання		
		Інтелектуальне управління ресурсами будівельного майданчика		
Автоматизоване управління будівельними процесами	Використання штучного інтелекту (AI) та машинного навчання	Аналіз та прогнозування термінів завершення будівництва	У Китаї AI-системи застосовуються для управління будівельними процесами, що дозволяє скоротити терміни будівництва на 30 %.	
		Визначення найкращих технологічних рішень на основі великих даних		
		Автоматизація документообігу та звітності		
	Автоматизовані системи контролю якості та безпеки	Використовуються для аерофотозйомки будівельних майданчиків, аналізу виконаних робіт та оцінки відповідності проєкту	Скорочують витрати на інспекцію та підвищують рівень контролю	У Великій Британії дрони використовуються для перевірки фасадів будівель, що знижує витрати на контрольні перевірки на 40 %
		Скорочують витрати на інспекцію та підвищують рівень контролю		
	Використання роботизованих технологій	Роботи-муляри – автоматизують процес кладки цегли, скорочуючи час зведення стін	3D друк будівель – дозволяє друкувати житлові будинки за лічені дні	У США та Китаї роботи-муляри викладають до 3000 цеглин за день, що значно перевищує продуктивність людини
Автоматизовані системи для внутрішнього оздоблення – роботи можуть виконувати фарбування, штукатурку та інші оздоблювальні роботи				
Автоматизовані системи для внутрішнього оздоблення – роботи можуть виконувати фарбування, штукатурку та інші оздоблювальні роботи				
Нові підходи до організації будівництва	Модульне будівництво та prefab-технології	Модульні будинки збираються на заводі та транспортуються на місце будівництва, що дозволяє скоротити витрати на 30–50 %	У Сінгапурі prefab-технології використовуються для будівництва соціального житла, що дозволяє значно скоротити терміни проєктів	
		Prefab (prefabrication) – виготовлення конструкційних елементів будівлі на виробництві для швидкого монтажу на об'єкті		
	Lean Construction – ощадливе будівництво	Мінімізація витрат та скорочення відходів	Чітке планування процесів	Впровадження Lean Construction у європейських країнах дозволяє знизити витрати будівництва на 15–20 % без втрати якості
		Використання лише необхідних ресурсів у потрібний момент		
	Системи автоматизованого управління логістикою	Автоматизовані системи відстеження поставчань скорочують ризики затримок у будівництві	Прогнозування потреб у матеріалах за допомогою AI зменшує витрати та запобігає простоюванню	Використання програмного забезпечення для управління логістикою у США дозволяє скоротити витрати на транспортування матеріалів на 10–15 %
		Прогнозування потреб у матеріалах за допомогою AI зменшує витрати та запобігає простоюванню		

Незважаючи на високий теоретичний потенціал цифрових технологій у трансформації будівельної галузі, їх реальний вплив на ухвалення організаційно-технологічних рішень у сфері доступного житла вимагає подальшого емпіричного аналізу. Адже важливість технологій — не лише в їх інноваційності, а й у здатності забезпечити практичні переваги для девелоперів, замовників та користувачів житла. Також в дослідженні було цікаво проаналізувати відношення спеціалістів в питанні впливу використання сучасних технологій на економічні, організаційні та технологічні показники будівництва доступного житла.

З метою кількісного оцінювання ступеня впливу різних чинників — як економічних, інфраструктурних, так і технологічних — на вибір організаційно-технологічних рішень у будівництві доступного житла, було проведено узагальнене експертне опитування щодо факторів які потенційно можуть визначати структуру, організацію та пріоритети реалізації відповідних проєктів в умовах України [2].

На основі досліджень організаційно-технологічних рішень будівництва доступного житла були виділені основні фактори, які можуть мати вплив на вибір організаційно-технологічних рішень будівництва доступного житла в умовах України:

- вартість будівельних матеріалів (x_1);
- витрати на робочу силу (x_2);
- витрати на енергоресурси (x_3);
- логістичні витрати (x_4);
- використання локальних (місцевих) матеріалів (x_5);
- застосування сучасних технологій в будівельних роботах (x_6);
- довговічність та енергоефективність (x_7);
- щільність забудови та доступність ділянок (x_8);
- реконструкція та ревіталізація промислових зон (x_9);
- баланс між житлом та робочими місцями (x_{10});
- доступність інженерних комунікацій (x_{11});

- транспортна доступність (x_{12});
- соціальна інфраструктура (x_{13});
- тип ґрунту та рельєф (x_{14});
- екологічні вимоги (x_{15});
- використання BIM-технологій і штучного інтелекту (x_{16});

До оцінювання було залучено 20 експертів, до складу яких входили як науковці закладу вищої освіти так і будівельники практики. Застосовано процедуру колективних експертних оцінок. Експертні думки збирали шляхом заочного анкетного опитування. Експертизу здійснювали в один тур. Експертам було надіслано анкету з факторами, розташованими в довільному порядку. Кожному з факторів надано умовне позначення: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{16}$. Експертам було запропоновано розташувати ці фактори в порядку суттєвості їх впливу на організаційно-технологічні рішення при будівництві доступного житла. Для ранжування експерт має розташувати фактори в порядку, який йому видається найбільш доцільним, і присвоїти кожному з них числа натурального ряду — ранги. При цьому ранг 1 відповідає вищому ступеню значущості впливу під час відбору факторів, а ранг N — найменшому. Відповідно порядкова шкала, одержувана в результаті ранжування, повинна задовольняти умову рівності числа рангів N числу ранжованих факторів n . Результати опитування експертів зведено в табл. 2.

На основі даних таблиці визначено коефіцієнт конкордації думок експертів, який дорівнює 0,54, що свідчить про середню узгодженість думок експертів.

$$K_{\text{кон}} = 0,535.$$

Значення коефіцієнта конкордації перевіряється по критерію Пірсона:

$$\chi_p^2 = 151,03.$$

Табличне значення χ^2 -критерію для $P(\chi^2) = 0,05$ та числа ступенів свободи $d.f. = (16-1) = 15$ дорівнює $\chi_{\text{табл.}}^2 = 25,0$.

На основі даних таблиці 2 побудована діаграма сумарних рангів досліджуваних факторів за результатами експертного оцінювання на рисунку.

Таблиця 2

Результати опитування експертів

Експерти	Фактори																Сума
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	
1	6	13	12	1	9	3	4	2	15	5	10	11	14	8	16	7	136
2	1	2	7	6	12	4	3	9	10	13	16	5	15	8	11	14	136
3	1	3	2	6	8	5	13	12	4	15	7	9	10	11	14	16	136
4	8	7	2	11	1	16	5	12	14	10	4	9	3	6	15	13	136
5	1	3	4	2	6	9	8	7	5	10	12	11	13	15	16	14	136
6	1	2	13	7	4	3	12	6	16	15	8	10	5	11	14	9	136
7	1	2	3	4	7	11	9	12	15	13	8	14	10	5	6	16	136
8	1	5	6	4	7	14	8	2	9	12	3	11	10	16	13	15	136
9	1	2	11	8	3	6	4	16	14	13	5	12	15	10	7	9	136
10	2	7	15	10	11	13	12	9	1	14	6	5	4	3	16	8	136
11	5	4	3	2	1	8	12	9	10	13	6	15	14	11	16	7	136
12	1	7	2	6	3	16	5	12	14	10	4	9	15	11	8	13	136
13	1	5	6	10	2	3	4	16	15	14	7	11	12	8	9	13	136
14	1	2	4	6	3	5	9	16	15	14	7	10	8	13	12	11	136
15	1	2	5	10	12	9	6	4	16	8	11	7	3	14	13	15	136
16	4	8	5	6	7	10	9	11	14	13	3	12	2	15	1	16	136
17	1	7	13	6	5	8	15	16	4	2	9	3	12	10	11	14	136
18	4	1	5	8	6	10	11	15	14	3	12	7	2	13	16	9	136
19	1	5	6	2	3	4	12	7	10	16	8	15	13	9	11	14	136
20	5	4	3	2	1	8	12	9	10	13	6	15	14	11	16	7	136
S	47	91	127	117	111	165	173	202	225	226	152	201	194	208	241	240	2720
S _{exp}	2,35	4,55	6,35	5,85	5,55	8,25	8,65	10,1	11,25	11,3	7,6	10,05	9,7	10,4	12,05	12	136
d _j	-89	-45	-9	-19	-25	29	37	66	89	90	16	65	58	72	105	104	
(d _j) ²	7921	2025	81	361	625	841	1369	4356	7921	8100	256	4225	3364	5184	11025	10816	68470

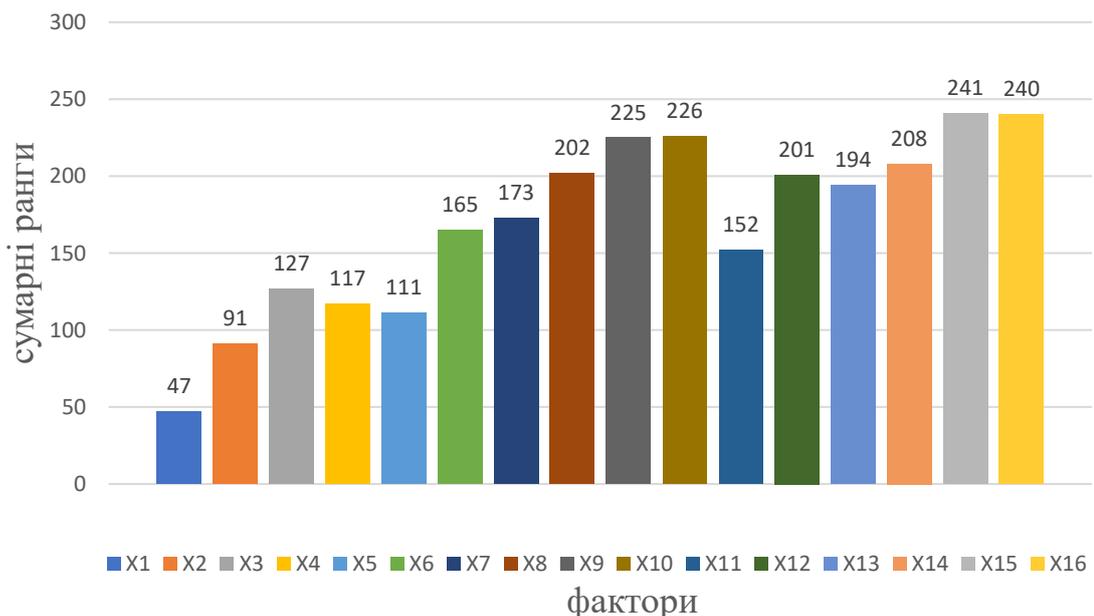


Рис. Діаграма сумарних рангів досліджуваних факторів за результатами експертного оцінювання

Фактори, що впливають на вибір організаційно-технологічних рішень в будівництві доступного житла

№ з/п	Фактори	Ступінь впливу на вибір організаційно-технологічних рішень будівництва доступного житла		
		високий	середній	низький
1	вартість будівельних матеріалів (x_1)	+		
2	витрати на робочу силу (x_2)	+		
3	витрати на енергоресурси (x_3)	+		
4	логістичні витрати (x_4)	+		
5	використання локальних (місцевих) матеріалів (x_5)	+		
6	застосування сучасних технологій в будівельних роботах (x_6)		+	
7	довговічність та енергоефективність (x_7)		+	
8	щільність забудови та доступність ділянок (x_8)			+
9	реконструкція та ревіталізація промислових зон (x_9)			+
10	баланс між житлом та робочими місцями (x_{10})			+
11	доступність інженерних комунікацій (x_{11})		+	
12	транспортна доступність (x_{12})			+
13	соціальна інфраструктура (x_{13})			+
14	тип ґрунту та рельєф (x_{14})			+
15	екологічні вимоги (x_{15})			+
16	використання BIM-технології і штучного інтелекту (x_{16})			+

Висновки

У результаті дослідження було проаналізовано спектр організаційно-технологічних рішень, які використовуються або можуть бути ефективно впроваджені в будівництві доступного житла в умовах цифрової трансформації галузі. Проведено експертне ранжування шістнадцяти ключових факторів, що впливають на вибір таких рішень, зокрема — вартісні, ресурсні, просторові, технологічні та цифрові аспекти.

Згідно з узагальненими результатами експертного опитування, до факторів із найвищим ступенем впливу віднесено: вартість будівельних матеріалів, витрати на робочу силу, енергоресурси, логістичні витрати та доступність локальних матеріалів. Це свідчить про пріоритетність економічних чинників у процесі прийняття рішень щодо реалізації проєктів доступного житла в українських реаліях.

Натомість фактор використання BIM-технологій, штучного інтелекту та цифрових інструментів управління (×16), попри свою

теоретичну ефективність та загально визнану інноваційність, посів одне з останніх місць у рейтингу експертної значущості.

Цей факт може свідчити про розрив між потенціалом цифрових технологій у будівництві та їх реальним впливом на ухвалення рішень у вітчизняній практиці, що зумовлено такими чинниками:

- обмеженим рівнем цифрової культури управління в будівельних компаніях;
- браком кваліфікованих фахівців у сфері BIM;
- недоступністю або високою вартістю програмного забезпечення;
- інерційністю нормативної бази та технологічного ланцюга.

Таким чином, подальші дослідження повинні бути спрямовані не лише на оптимізацію технологічних рішень, а й на пошук шляхів підвищення впроваджуваності цифрових інструментів у процеси проєктування, будівництва та експлуатації житла, зокрема – через освітні ініціативи, оновлення стандартів та підтримку інноваційних пілотних проєктів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Анін Б. І., Пастухова С. В., Білов Ю. О., Метеленко Н. Г. Інноваційні інформаційні технології як вдосконалення організаційних процесів будівництва. *Мости та тунелі : теорія, дослідження, практика*. 2023. № 23. С. 5–16. DOI: 10.15802/bttrp2023/281073.
2. Большаков В. І., Кравчуновська Т. С., Броневицький С. П. Фактори, що здійснюють визначальний вплив на показники ефективності організаційно-технологічних рішень будівництва доступного житла. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. № 5 (218). С. 61–70.
3. Зайко О. М., Заяць Є. І. Аналіз організаційно-технологічних рішень будівництва малоповерхових житлових будівель з урахуванням раціонального споживання енергоресурсів. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2025. № 1. С. 97–105.
4. Кулік М. В., Куліш С. О., Іщенко С. С. Впровадження новітніх цифрових програмних комплексів на базі BIM-технологій у будівництві України. *Науковий вісник будівництва*. 2020. Т. 100, № 2. С. 301–305. URL: <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/360>
5. Кушнір С. І., Бондар О. А., Поколенко В. О. Застосування BIM-технологій для потреб моделювання циклу будівельного проєкту та адміністрування. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2019. DOI: 10.15802/bttrp2019/172376.
6. Остапюк М. О. Формування і вибір організаційно-технологічних рішень будівництва доступного житла: магістерська кваліфікаційна робота. Дніпро : УДУНТ, ННІ ПДАБА, 2025. 98 с.
7. Brad Hardin, Dave McCool, Wiley-Blackwell. BIM and Construction Management : Proven Tools, Methods, and Workflows. 2nd ed. 2015. 416 p.
8. Demian P., Hassan T. M., Kalmykov O., Demianenko I., Makarov R. BIM Implementation in Post-War Reconstruction of Ukraine. *Buildings*. 2024. Vol. 14, № 11. Art. 3495. DOI: 10.3390/buildings14113495. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/11/3495>

REFERENCES

1. Anin B.I., Pastukhova S.V., Bilov Yu.O. and Metelenko N.H. *Innovatsiini informatsiini tekhnolohii yak vdoskonalennia orhanizatsiinykh protsesiv budivnytstva* [Innovative information technologies as an improvement of organizational processes in construction]. *Mosty ta tuneli : teoriia, doslidzhennia, praktyka* [Bridges and tunnels: theory, research, practice]. 2023, no. 23, pp. 5–16. DOI: 10.15802/bttrp2023/281073. (in Ukrainian).
2. Bolshakov V.I., Kravchunovska T.S. and Bronevitskyi S.P. *Faktory, shcho zdiisniuiut vyznachalniy vplyv na pokaznyky efektyvnosti orhanizatsiino-tekhnolohichnykh rishen budivnytstva dostupnoho zhytla* [Factors that have a decisive influence on the efficiency indicators of organizational and technological solutions for the construction of affordable housing]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2016, no. 5 (218), pp. 61–70. (in Ukrainian).
3. Zaiko O.M. and Zaiats Ye.I. *Analiz orhanizatsiino-tekhnolohichnykh rishen budivnytstva malopoverkhovykh zhytlovykh budivel z urakhuvanniam ratsionalnoho spozhyvannia enerhoresursiv* [Analysis of organizational and technological solutions for the construction of low-rise residential buildings taking into account the rational consumption of energy resources]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2025, no. 1, pp. 97–105. (in Ukrainian).
4. Kulik M.V., Kulish S.O. and Ishchenko S.S. *Vprovadzhennia novitnikh tsyfrovyykh prohramnykh kompleksiv na bazi BIM tekhnolohii u budivnytstvi Ukrainy* [Introduction of the latest digital software packages based on BIM technologies in the construction of Ukraine]. *Naukovyi visnyk budivnytstva* [Scientific Bulletin of Construction]. 2020, vol. 100, no. 2, pp. 301–305. URL: <https://svc.kname.edu.ua/index.php/svc/article/view/360> (in Ukrainian).
5. Kushnir S.I., Bondar O.A., Pokolenko V.O. and oth. *Zastosuvannia BIM tekhnolohii dlia potreb modeliuvannia tsyklu budivelnogo proiektu ta administruvannia* [Application of BIM technologies for the needs of modeling the construction project cycle and administration]. *Mosty ta tuneli : teoriia, doslidzhennia, praktyka* [Bridges and tunnels : theory, research, practice]. 2019. DOI: 10.15802/bttrp2019/172376. (in Ukrainian).
6. Ostapiuk M.O. *Formuvannia i vybir orhanizatsiino-tekhnolohichnykh rishen budivnytstva dostupnoho zhytla : mahisterska kvalifikatsiina robota* [Formation and selection of organizational and technological solutions for the construction of affordable housing : master's thesis]. Dnipro : USUST, ESA PSACEA, 2025, 98 p. (in Ukrainian).
7. Brad Hardin, Dave McCool, Wiley-Blackwell. BIM and Construction Management : Proven Tools, Methods, and Workflows. 2nd edition, 2015, 416 p.
8. Demian P., Hassan T. M., Kalmykov O., Demianenko I. and Makarov R. BIM Implementation in Post War Reconstruction of Ukraine. *Buildings*. 2024, vol. 14, no. 11, article 3495. DOI: 10.3390/buildings14113495. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/11/3495>

Надійшла до редакції: 12.09.2025.

УДК 69.05.9.7

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.241225.120.1215

ДОСЛІДЖЕННЯ ВАРІАНТІВ ОРГАНІЗАЦІЇ МОНТАЖУ КОНСТРУКЦІЙ ОДНОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД УМОВ ВИРОБНИЦТВА

МАРТИШ О. П.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,

МАРТИШ О. О.², канд. техн. наук, доц.,

ГОРІН Р. О.³, магістр-науковець,

ТИМОШЕНКО О. А.⁴, канд. техн. наук, доц.,

НАГОРНИЙ Д. В.⁵, канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра технології будівельного виробництва, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 410-42-20, e-mail: martysh.oleksandra@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6126-1920

² Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (093) 713-23-77, e-mail: martysh.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-8864-2555

³ Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 175-84-37, e-mail: ruslanhorin96@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-5303-7370

⁴ Кафедра охорони праці, цивільної та екологічної безпеки, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 452-43-63, e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

⁵ Кафедра будівельної і теоретичної механіки та опору матеріалів, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 566-88-85, e-mail: d.nagorny@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5961-8580

Анотація. *Постановка проблеми.* Будівництво є однією з найважливіших галузей національної економіки, що забезпечує створення і реконструкцію будівель і споруд та об'єктів інфраструктури. В сучасному будівництві відбуваються постійні зміни щодо будівельних конструкцій із різних матеріалів; об'ємно-планувальних та конструктивних рішень промислових будівель; раціонального проектування і умов експлуатації будівельних конструкцій та будівель і споруд; вдосконалення технології та організації будівельних процесів, пов'язаних із зведенням і реконструкцією будівель та споруд і їх комплексів, зокрема в особливих умовах; проектування технологічних процесів і організації будівельного виробництва з використанням сучасного інформаційного забезпечення й обчислювальної техніки; комплексної механізації та автоматизації будівельних процесів. Також відбуваються зміни щодо планування і організації будівельних робіт, обумовлені впровадженням технологій будівельного інформаційного моделювання у поєднанні зі штучним інтелектом та Інтернетом речей. Монтажні роботи являють собою провідний комплексний процес у спорудженні будівель, від характеристик виконання якого залежатиме якість і довговічність експлуатації будівлі. В зв'язку з цим дослідження присвячені питанням варіантного проектування організації монтажу конструкцій одноповерхових будівель промислових підприємств в залежності від умов виробництва є актуальною та своєчасною. **Мета роботи:** розроблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо системи факторів, які визначають специфіку технології та організації монтажу конструкцій при реконструкції промислових одноповерхових будівель. Сформульована мета зумовила необхідність **вирішення** таких **завдань:** аналіз зарубіжного та вітчизняного досвіду, законодавчих актів, нормативних документів щодо виконання робіт із монтажу конструкцій промислових будівель при реконструкції діючих промислових підприємств; аналіз особливостей архітектурних, об'ємно-планувальних та конструктивних рішень промислових будівель та умов виробництва робіт при реконструкції промислових будівель; обґрунтувати систему факторів, які здійснюють визначальний вплив на тривалість, вартість і трудомісткість реконструкції промислових одноповерхових будівель. **Об'єкт дослідження:** процес монтажу конструкцій одноповерхових промислових будівель при реконструкції діючих підприємств. **Предмет дослідження:** архітектурні, об'ємно-планувальні та конструктивні рішення промислових одноповерхових будівель; організаційно-технологічні рішення виробництва монтажних робіт при реконструкції діючих підприємств. **Методи дослідження:** аналіз і узагальнення; теорія систем і системний аналіз; моделювання виробничих процесів, методи організаційно-технологічного моделювання. **Наукова новизна отриманих результатів:** обґрунтовано систему факторів, які відображають особливості архітектурних, об'ємно-планувальних та конструктивних рішень промислових одноповерхових будівель та специфіку умов виробництва робіт при реконструкції промислових будівель та здійснюють визначальний вплив

на тривалість, вартість і трудомісткість реконструкції промислових одноповерхових будівель. **Практичне значення отриманих результатів:** результати виконаної роботи можуть бути використані при створенні моделей прогнозування значень техніко-економічних показників (тривалості, вартості, трудомісткості) проектів реконструкції промислових одноповерхових будівель. **Основна частина.** Обґрунтування системи факторів, які відображають особливості архітектурних, об'ємно-планувальних та конструктивних рішень промислових будівель та специфіку умов виробництва робіт при реконструкції промислових одноповерхових будівель та здійснюють визначальний вплив на тривалість, вартість і трудомісткість реконструкції промислових одноповерхових будівель. **Висновки.** Визначено, що реконструкцію промислових будівель характеризують певні особливості, не властиві новому будівництву. Для порівняння альтернативних варіантів організаційно-технологічних рішень реконструкції промислових одноповерхових будівель і вибору раціонального з них використовують різні техніко-економічні показники ефективності будівельних робіт. Для прогнозування значень техніко-економічних показників в межах наявних ресурсних та часових обмежень сформовано сукупність факторів, які здійснюють вплив на тривалість, вартість і трудомісткість реконструкції промислових одноповерхових будівель. Врахування комплексного впливу факторів, що відображають особливості будівельного генерального плану, об'ємно-планувальних рішень, конструктивних рішень, виконання монтажних та демонтажних робіт, дозволить приймати обґрунтовані рішення щодо реконструкції промислових одноповерхових будівель. Для цього було застосовано методи експертних оцінок. Із залученням експертів було визначено 10 із 20 факторів, які відображають специфіку реконструкції промислових одноповерхових будівель та визначають показники ефективності організаційно-технологічних рішень (тривалість, вартість, трудомісткість). Для створення моделей прогнозування значень техніко-економічних показників (тривалості, вартості, трудомісткості) проектів реконструкції промислових одноповерхових будівель отримано кількісні значення факторів, які здійснюють найбільший вплив на техніко-економічні показники.

Ключові слова: технологія виробництва робіт; монтаж конструкцій; організація виробництва; промислова будівля; умови виробництва робіт

DEVELOPMENT OF CONSTRUCTIVE DESIGN OF PICKLING UNITS FOR OPERATION IN HIGHLY AGGRESSIVE HOT SULPHURIC ACID SOLUTIONS

MARTYSH O.P.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
MARTYSH O.O.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
HORIN R.O.³, *Master of science*,
TYMOSHENKO O.A.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
NAGORNYI D.V.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

^{1*} Department of Construction Production Technology, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (097) 410-42-20, e-mail: martysh.oleksandra@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6126-1920

² Department of Organisation and Management in Construction, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (093) 713-23-77, e-mail: martysh.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-8864-2555

³ Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (095) 175-84-37, e-mail: ruslanhorin96@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-5303-7370

⁴ Department of Labor Protection, Civil and Environmental Safety, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 452-43-63, e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3114-9820

⁵ Department of Structural and Theoretical Mechanics and Strength of Materials, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 566-88-85, e-mail: d.nagorny@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5961-8580

Abstract. Problem statement. Construction is one of the most important sectors of the national economy, ensuring the creation and reconstruction of buildings and structures and infrastructure facilities. In modern construction, there are constant changes in building structures made of various materials; spatial planning and design solutions for industrial buildings; rational design and operating conditions of building structures and buildings and structures; improvement of technology and organization of construction processes related to the construction and reconstruction of buildings and structures and their complexes, in particular in special conditions; design of technological processes and organization of construction production using modern information support and computer technology; comprehensive

mechanization and automation of construction processes. There are also changes in the planning and organization of construction work, due to the introduction of building information modeling technologies in combination with artificial intelligence and the Internet of Things. Installation work is a leading complex process in the construction of buildings, the quality and durability of the building's operation will depend on the characteristics of its execution. In this regard, research devoted to the issues of variant design of the organization of installation of structures of single-story buildings of industrial enterprises depending on production conditions is relevant and timely. **The purpose of the work:** development of scientifically based recommendations regarding the system of factors that determine the specifics of the technology and organization of installation of structures during the reconstruction of industrial one-story buildings. The formulated goal necessitated **the solution** of the following **tasks:** analysis of foreign and domestic experience, legislative acts, regulatory documents on the performance of works on the installation of industrial building structures during the reconstruction of existing industrial enterprises; analysis of the features of architectural, spatial planning and constructive solutions of industrial buildings and the conditions of production of works during the reconstruction of industrial buildings; to substantiate the system of factors that have a decisive influence on the duration, cost and labor intensity of the reconstruction of industrial single-story buildings. **The object of research:** the process of installing structures of single-story industrial buildings during the reconstruction of existing enterprises. **The subject of the research:** architectural, spatial planning and structural solutions of industrial one-story buildings; organizational and technological solutions for the production of installation works during the reconstruction of existing enterprises. **Research methods:** analysis and generalization; systems theory and systems analysis; modeling of production processes, methods of organizational and technological modeling. **Practical significance of the results obtained:** the results of the work performed can be used in creating models for predicting the values of technical and economic indicators (duration, cost, labor intensity) of projects for the reconstruction of industrial one-story buildings. **Main part.** Substantiation of the system of factors that reflect the features of architectural, spatial planning and constructive solutions of industrial buildings and the specifics of the conditions for the production of works during the reconstruction of industrial one-story buildings and have a decisive influence on the duration, cost and labor intensity of the reconstruction of industrial one-story buildings to compare alternative organizational and technological solutions for the reconstruction of industrial buildings and choose the most rational one, various technical and economic indicators of the efficiency of construction work are used. **Conclusions.** To predict the values of technical and economic indicators within the existing resource and time constraints, a set of factors has been formed that influence the duration, cost and labor intensity of the reconstruction of industrial single-story buildings. Taking into account the complex influence of factors that reflect the features of the construction master plan, spatial planning decisions, design decisions, and the performance of installation and dismantling works will allow making informed decisions regarding the reconstruction of industrial one-story buildings. With the involvement of experts, 10 out of 20 factors were identified that reflect the specifics of the reconstruction of industrial one-story buildings and determine the effectiveness of organizational and technological solutions (duration, cost, labor intensity). To create models for predicting the values of technical and economic indicators of projects for the reconstruction of industrial one-story buildings, quantitative values of factors that have the greatest impact on technical and economic indicators were obtained.

Keywords: *technology of work production; installation of structures; production organisation; industrial building; conditions of work production*

Постановка проблеми. Будівництво є однією з найважливіших галузей національної економіки, що забезпечує створення і реконструкцію будівель і споруд та об'єктів інфраструктури. Виконання монтажних робіт належить до витратних і трудомістких процесів, які потребують ретельної підготовки монтажного майданчика, будівельних конструкцій, монтажних кранів та обладнання. Монтажні підприємств в залежності від умов виробництва є актуальною та своєчасною.

Аналіз сучасних літературних джерел показує, що в сучасному будівництві відбуваються постійні зміни щодо будівельних конструкцій із різних матеріалів; об'ємно-планувальних та

конструктивних рішень промислових будівель; раціонального проектування і умов експлуатації будівельних конструкцій та будівель і споруд; вдосконалення технології та організації будівельних процесів, пов'язаних із зведенням і реконструкцією будівель та споруд і їх комплексів, зокрема в особливих умовах; проектування технологічних процесів і організації будівельного виробництва з використанням сучасного інформаційного забезпечення й обчислювальної техніки; комплексної механізації та автоматизації будівельних процесів.

Також відбуваються зміни щодо планування і організації будівельних робіт, обумовлені впровадженням технологій

будівельного інформаційного моделювання у поєднанні зі штучним інтелектом та Інтернетом речей.

Мета роботи. Розроблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо системи факторів, які визначають специфіку технології та організації монтажу конструкцій при реконструкції промислових одноповерхових будівель.

Сформульована мета зумовила необхідність вирішення таких **завдань**:

– аналіз зарубіжного та вітчизняного досвіду, законодавчих актів, нормативних документів щодо виконання робіт із монтажу конструкцій промислових будівель при реконструкції діючих промислових підприємств;

– аналіз особливостей архітектурних, об'ємно-планувальних та конструктивних рішень промислових будівель та умов виробництва робіт при реконструкції промислових будівель;

– обґрунтувати систему факторів, які здійснюють визначальний вплив на тривалість, вартість і трудомісткість реконструкції промислових одноповерхових будівель.

Об'єкт дослідження. Процес монтажу конструкцій одноповерхових промислових будівель при реконструкції діючих підприємств.

Предмет дослідження. Архітектурні, об'ємно-планувальні та конструктивні рішення промислових одноповерхових будівель; організаційно-технологічні рішення виробництва монтажних робіт при реконструкції діючих підприємств.

Методи дослідження. Аналіз і узагальнення; теорія систем і системний аналіз; моделювання виробничих процесів, методи організаційно-технологічного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів. Обґрунтовано систему факторів, які відображають особливості архітектурних, об'ємно-планувальних та конструктивних рішень промислових одноповерхових будівель та специфіку умов виробництва робіт при реконструкції промислових будівель та здійснюють визначальний вплив на тривалість, вартість і трудомісткість реконструкції промислових одноповерхових будівель.

Практичне значення отриманих результатів. Результати виконаної роботи можуть бути використані при створенні моделей прогнозування значень техніко-економічних показників (тривалості, вартості, трудомісткості) проектів реконструкції промислових одноповерхових будівель.

Виклад результатів досліджень. До повномасштабного вторгнення будівельна галузь демонструвала активні позитивні тенденції до зростання та розвитку завдяки залученню інвестицій, які дозволяли розширювати виробничі потужності та поліпшувати якість будівельної продукції.

Проте повномасштабне вторгнення Російської Федерації в Україну 24 лютого 2022 року суттєво вплинуло на будівельну галузь, спричинивши:

- падіння обсягів виробництва;
- нестачу сировини;
- порушення логістичних ланцюжків;
- пошкодження та руйнування виробничих потужностей;
- втрату висококваліфікованих кадрів;
- нестачу робочої сили в цілому;
- скорочення обсягів інвестицій [4].

За даними Державної служби статистики України [2], розподіл обсягів виробленої будівельної продукції за характером будівництва у 2013–2024 роках представлений на рисунку 1.

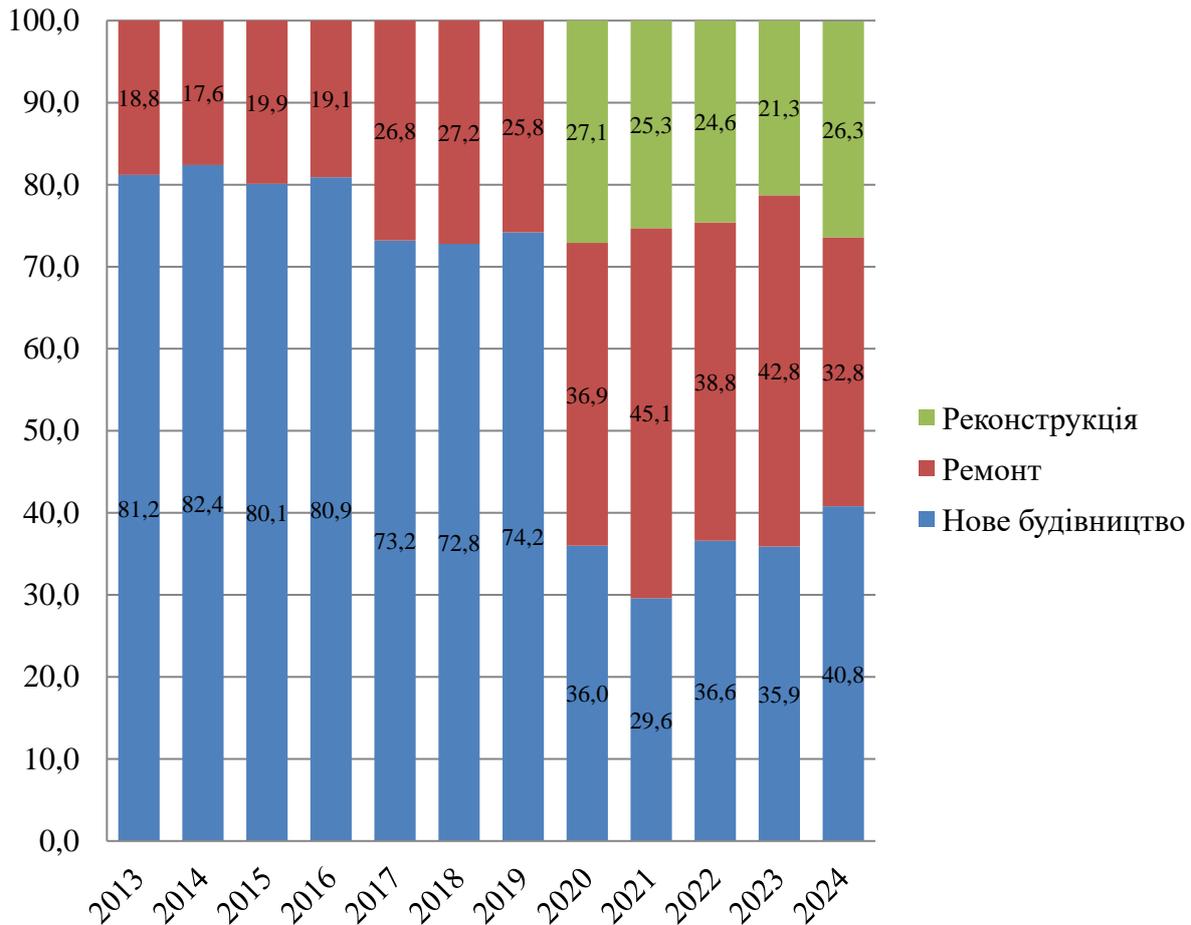


Рис. 1. Розподіл обсягів виробленої будівельної продукції за характером будівництва у 2013–2024 роках (%)

Як свідчать дані, представлені на рисунку 1, протягом 2020–2024 років структура розподілу обсягів виробленої будівельної продукції за характером будівництва суттєво змінилась:

- обсяги нового будівництва зменшилися майже вдвічі, до 30–40 %;
- обсяги робіт із капітального та поточного ремонтів збільшилися більш ніж удвічі, до 33–45 %;
- додалися роботи з реконструкції, які становлять 20–25 %.

Як свідчать дані про обсяг вироблених нежитлових будівель за видами у 2018–2024 роках у вартісному вираженні (млн грн) демонструє такі тенденції [2]:

- у 2022 році спостерігався спад, вочевидь обумовлений початком широкомасштабного вторгнення Російської Федерації в Україну, але будівельна галузь адаптувалась до цих нових викликів і почала демонструвати зростання у 2023–2024

роках, майже досягнувши довоєнного рівня 2021 року;

- частка в обсязі виробленої будівельної продукції, яка припадає на промислові та складські будівлі, поступово зростає.

За даними Київської школи економіки [3], станом на листопад 2024 року прямі збитки, завдані об'єктам нерухомості, інфраструктурі, транспортним засобам та запасам оцінюються в 169,8 млрд USD, і майже третина завданих збитків припадає на сектор промисловості та енергетики.

Все вищевикладене обумовлює об'єктивну потребу у відновленні пошкоджених промислових будівель та будівництві нових виробничих потужностей.

Серед промислових будівель значна частка припадає саме на одноповерхові промислові будівлі площею 3000–20000 м².

Промислові одноповерхові будівлі є найпопулярнішими та найпоширенішими серед об'єктів промислової нерухомості, в яких можна достатньо просто і при цьому ефективно розташувати технологічне обладнання і налагодити виробничий процес.

Величина прогонів найчастіше 6 м, 12 м, 18 м, 24 м, 30 м. Висота одноповерхових промислових будівель від 8,4 м до 18 м. Маса конструкцій від 2,5 т до 33 т.

Промислові одноповерхові будівлі мають однотипові відсіки, конструкції та великі розміри в плані.

До основних чинників, які визначають об'ємно-планувальні рішення промислових одноповерхових будівель, можна віднести такі: забезпечення логічності та послідовності технологічних операцій та потоків; мінімізація відстаней переміщення та пересування; необхідний захист від забруднень; зведення до мінімуму дій із матеріалами; забезпечення необхідної організації виробництва та необхідного доступу.

Вищезазначені особливості архітектурних, об'ємно-планувальних та конструктивних рішень промислових одноповерхових будівель визначають специфіку виконання робіт із монтажу конструкцій.

Частка робіт із монтажу конструкцій при будівництві промислових будівель і споруд постійно збільшується. При будівництві промислових будівель частка монтажних робіт в середньому становить 35 %, а на деяких об'єктах навіть досягає 50–60 % від загального обсягу виконуваних робіт.

Специфіка монтажу конструкцій промислових одноповерхових будівель обумовлена: розмірами промислової будівлі в плані; необхідністю монтажу ряду конструкцій через їх вагу та висоту окремими частинами або двома кранами; потребою сумістити монтаж конструкцій із монтажем технологічного обладнання в будівлі у тому випадку, якщо є вимога щодо прискореної задачі об'єкта в експлуатацію.

Вибір методів та організації монтажу конструкцій промислових будівель доцільно здійснювати за такими критеріями: обсяг робіт із монтажу конструкцій; об'ємно-планувальні і конструктивні рішення будівлі; визначені терміни монтажу конструкцій та спорудження будівлі в цілому; наявний парк монтажних механізмів.

Незважаючи на широке коло виконаних наукових досліджень у галузі технології та організації виробництва будівельних і демонтажних робіт, виконуваних при зведенні та реконструкції промислових будівель і споруд, сьогодні відсутнє вичерпне наукове обґрунтування організаційно-технологічних рішень, що враховувало б керовані динамічні трансформації технологічних, технічних і організаційних складових будівельного процесу.

Тому подальші дослідження, спрямовані на вдосконалення системи обґрунтування та вибору ефективних організаційно-технологічних рішень зведення, реконструкції та відновлення промислових одноповерхових будівель, які забезпечують високоефективне та стале виконання нестационарних будівельних процесів в складних, мінливих умовах зовнішнього середовища, при дотриманні вимог щодо енергоощадності та ресурсозбереження, є актуальними та своєчасними.

Питанням підвищення рівня технологічності проєктних рішень та надійності організаційно-технологічних рішень із будівництва і реконструкції промислових будівель та споруд, заснованих на принципах типізації та уніфікації, наукової організації праці, індустріалізації будівництва, комплексної механізації та автоматизації будівельних процесів, присвячені наукові праці багатьох учених.

Отже, здійснювати розвиток вітчизняних промислових підприємств потрібно з максимальним використанням існуючих виробничих будівель та споруд, що обумовлено як об'єктивними, так і суб'єктивними чинниками.

Об'єктивні чинники, що обумовлюють потребу в реконструкції промислових будівель, пов'язані з їх фізичним і моральним зносом.

Суб'єктивні чинники пов'язані зараз насамперед із наслідками воєнних дій, через які багато промислових підприємств зазнають пошкоджень та руйнувань.

Реконструкцію промислових будівель характеризують певні особливості, не властиві новому будівництву.

Для порівняння альтернативних варіантів організаційно-технологічних рішень реконструкції промислових одноповерхових будівель і вибору раціонального з них використовують різні техніко-економічні показники ефективності будівельних робіт. Основними техніко-економічними показниками є: собівартість; трудомісткість; тривалість.

Особливістю реконструкції промислових підприємств є велика стисненість будівельних майданчиків, необхідність виконання робіт без шкоди для діючого виробництва, застосування нетрадиційних методів виробництва робіт, наприклад з використанням гвинтокрилів.

Для кількісної оцінки впливу цих чинників на будівельне виробництво використовується система показників: рівень суміщення будівельних робіт із технологічними процесами виробництва реконструйованого промислового підприємства; рівень стисненості будівельного майданчика та робочих зон.

Основними принципами організаційно-технологічного проектування реконструкції промислових підприємств є: максимальне суміщення будівельних робіт із виробничими процесами промислового підприємства, яке підлягає реконструкції; забезпечення реконструкції промислових будівель і споруд із мінімальною перервою в їх експлуатації; забезпечення виконання будівельних робіт індустріальними методами.

На основі аналізу зведено відомості про особливості реконструкції промислових одноповерхових будівель та обмеження щодо організаційно-технологічних рішень.

Вивчивши наукову та нормативну літературу з питань технології та організації робіт із монтажу конструкцій при реконструкції промислових одноповерхових будівель із урахуванням умов виробництва, сформовано такі групи факторів, які відображають специфіку реконструктивних робіт та в тій чи іншій мірі здійснюють вплив на показники ефективності організаційно-технологічних рішень: особливості будівельного генерального плану; особливості об'ємно-планувальних рішень; особливості конструктивних рішень; особливості монтажних робіт; особливості виконання демонтажних робіт.

Фактори групи особливостей будівельного генерального плану: наявність діючих виробництв; наявність діючих систем інженерного забезпечення; наявність діючих автомобільних доріг або залізниць; наявність природних перешкод (яри, схили); щільність забудови.

Фактори групи особливостей об'ємно-планувальних рішень: велика частка прогонів малої ширини; індивідуальність конструктивних рішень; примикання реконструйованих будівель до існуючих будівель.

Фактори групи особливостей конструктивних рішень: різномірність та дрібносерійність конструкцій; необхідність забезпечення стійкості прогонів, що зберігаються; різноважність конструкцій.

Фактори групи особливостей монтажних робіт: підвищена концентрація монтажних кранів; погіршення використання кранів за вантажопідйомністю; обмежена доступність монтажної зони; виконання робіт, не властивих для монтажних процесів; необхідність влаштування технологічних перерв; обмеженість висотного габариту робочої зони крана.

Фактори групи особливостей виконання демонтажних робіт: вплив пори року на виконання демонтажних робіт; обмеженість у часі виконання демонтажних робіт; розосередженість ділянок об'єкта, на яких виконуватимуться демонтажні роботи.

Формування моделей для прогнозування значень техніко-економічних показників (тривалості, вартості, трудомісткості) проєктів реконструкції промислових одноповерхових будівель потребує накопичення достатньо великого масиву статистичних даних. Адже постійні зміни в зовнішньому та внутрішньому середовищі урізноманітнюють альтернативні варіанти рішень, а це потребує ухвалення оперативних рішень та постійного їх коригування з метою адаптації до змін, що відбуваються. Тому, зважаючи на обмежені можливості отримання великих масивів статистичної інформації щодо реконструкції промислових одноповерхових будівель, вважаємо доцільним застосування теорії експертних оцінок. Наразі експертні оцінки із залученням експертів є найбільш розповсюдженим способом швидкого отримання якісної інформації [1].

Мета проведення опитування: оцінити важливість впливу факторів на показники ефективності (тривалість, вартість, трудомісткість) організаційно-технологічних рішень реконструкції та відновлення промислових одноповерхових будівель.

Для проведення експертного опитування виконано формування сукупності факторів, які здійснюють визначальний вплив на тривалість, вартість і трудомісткість реконструкції промислових одноповерхових будівель.

В дослідженні брали участь 12 експертів, при відборі яких враховувалися фах експерта; досвід практичної роботи; вміння вирішувати творчі завдання; наукова інтуїція тощо.

Опитування експертів виконувалося заочно, в один тур. Для проведення опитування експертам була запропонована анкета, фактори в якій розміщені в довільному порядку.

За результатами опитувань експертів визначено значення коефіцієнта конкордації думок експертів, який дорівнює $W = 0,99$, що свідчить про високу узгодженість думок експертів.

Для оцінювання значущості коефіцієнту конкордації думок експертів розраховано значення критерію Пірсона (χ^2 -критерій), яке дорівнює $\chi^2 = 225,72$.

Було визначено табличне значення χ^2 -критерію для $P(\chi^2) = 0,05$ та числа ступенів свободи $d.f. = 20 - 1 = 19$ дорівнює $\chi^2_{табл} = 30,14$.

Таблиця 1

Анкета опитування експерта

Найменування факторів	Ранг
X1 – Наявність діючих виробництв	
X2 – Наявність діючих систем інженерного забезпечення	
X3 – Наявність діючих автомобільних доріг або залізниць	
X4 – Наявність природних перешкод (яри, схили)	
X5 – Щільність забудови	
X6 – Велика частка прогонів малої ширини	
X7 – Індивідуальність конструктивних рішень	
X8 – Примикання реконструйованих будівель до існуючих будівель	
X9 – Різноманітність та дрібносерійність конструкцій	
X10 – Необхідність забезпечення стійкості прогонів, що зберігаються	
X11 – Різноважність конструкцій	
X12 – Підвищена концентрація монтажних кранів	
X13 – Погіршення використання кранів за вантажопідйомністю	
X14 – Обмежена доступність монтажної зони	
X15 – Виконання робіт, не властивих для монтажних процесів	
X16 – Необхідність влаштування технологічних перерв	
X17 – Обмеженість висотного габариту робочої зони крана	
X18 – Вплив пори року на виконання демонтажних робіт	
X19 – Обмеженість у часі виконання демонтажних робіт	
X20 – Розосередженість ділянок об'єкта, на яких виконуватимуться демонтажні роботи	

Оскільки фактичне значення χ^2 суттєво перевищує табличне значення ($225,72 > 30,14$), то підтверджується

достатньо висока узгодженість думок експертів за всією сукупністю досліджуваних факторів.

За даними опрацювань результатів опитувань експертів побудовано діаграму сумарних рангів досліджуваних факторів (рис. 2).

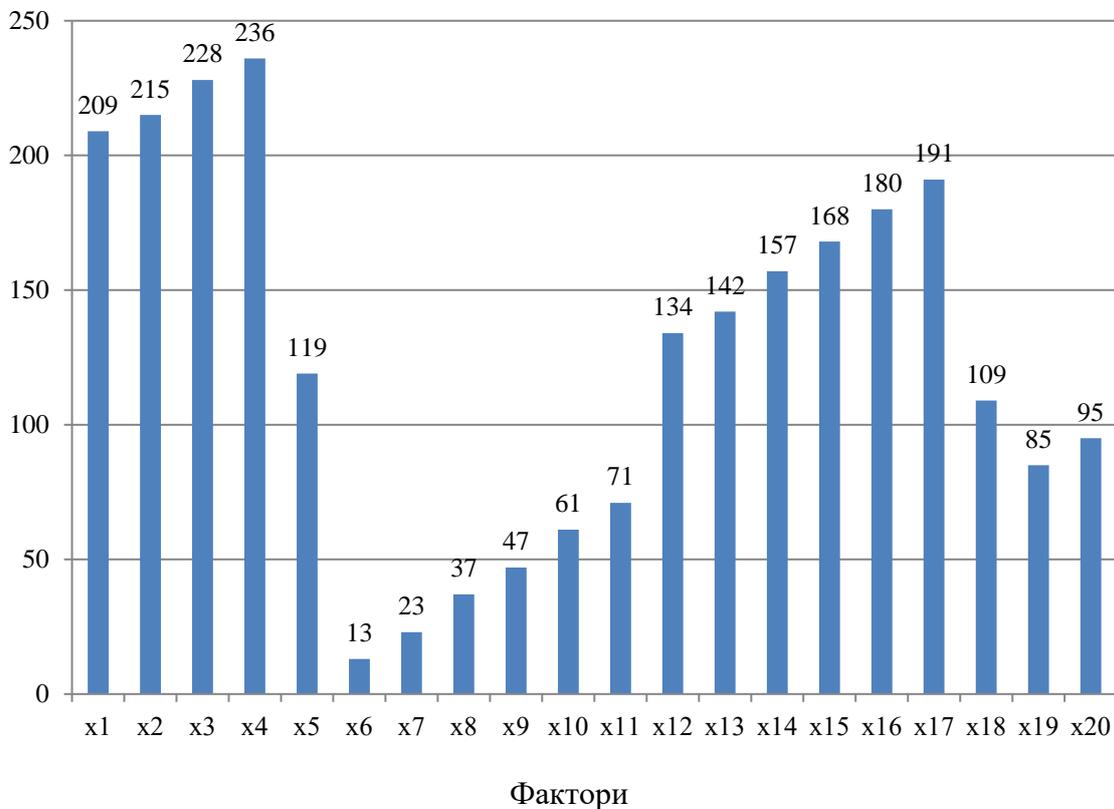


Рис. 2. Діаграма сумарних рангів досліджуваних факторів за результатами експертного оцінювання щодо їх впливу на показники ефективності організаційно-технологічних рішень реконструкції промислових одноповерхових будівель

За даними рисунку 2, враховуючи значення середнього рангу, яке дорівнює 126, можемо зробити висновок, що з досліджуваних 20 факторів визначальний (найбільший) вплив на показники ефективності організаційно-технологічних рішень реконструкції промислових одноповерхових будівель здійснюють такі фактори: X6; X7; X8; X9; X10; X11; X19; X20; X18; X5.

Середній ступінь впливу на показники ефективності організаційно-технологічних рішень здійснюють такі фактори: X12; X13; X14; X15; X16; X17.

Низький ступінь впливу на показники ефективності організаційно-технологічних рішень здійснюють такі фактори: X1; X2; X3; X4.

Для створення моделей прогнозування значень техніко-економічних показників (тривалості, вартості, трудомісткості)

проектів реконструкції промислових одноповерхових будівель в подальшому потрібно отримати кількісні значення факторів, які здійснюють найбільший вплив на техніко-економічні показники, зокрема із застосуванням методів експертних оцінок, та моделюванням зв'язку між досліджуваними показниками та факторами.

Висновки

Встановлено, що, зважаючи на воєнні дії на території України, внаслідок яких зазнали пошкоджень та руйнувань багато промислових об'єктів, відбувається зростання попиту на промислові та складські об'єкти.

Встановлено, що існує об'єктивна потреба у обґрунтуванні ефективних організаційно-технологічних рішень зведення та реконструкції промислових будівель і споруд, заснованих на

застосуванні сучасних методів організації будівельних робіт, використанні новітньої техніки і засобів механізації та автоматизації будівельних процесів, а також прогресивній та безпечній організації праці.

Визначено, що потребу в реконструкції промислових будівель обумовлюють чинники об'єктивного характеру, пов'язані з їх фізичним і моральним зносом, а також чинники суб'єктивного характеру, пов'язані насамперед із наслідками воєнних дій.

Доведено, що формування множини варіантів організації монтажу конструкцій промислових одноповерхових будівель з урахуванням умов виробництва потребує врахування великої кількості факторів.

Для порівняння альтернативних варіантів організаційно-технологічних рішень реконструкції і вибору раціонального з них використовують різні техніко-економічні показники ефективності.

Для прогнозування значень техніко-економічних показників в межах наявних ресурсних та часових обмежень доцільно сформулювати сукупність факторів, які здійснюють вплив на тривалість, вартість і

трудомісткість реконструкції промислових одноповерхових будівель.

Врахування комплексного впливу факторів, що відображають особливості будівельного генерального плану, об'ємно-планувальних рішень, конструктивних рішень, виконання монтажних та демонтажних робіт, дозволить приймати обґрунтовані рішення щодо реконструкції промислових одноповерхових будівель.

Для цього було застосовано методи експертних оцінок. Із залученням експертів було визначено 10 із 20 факторів, які відображають специфіку реконструкції промислових одноповерхових будівель та визначають показники ефективності організаційно-технологічних рішень (тривалість, вартість, трудомісткість).

Для створення моделей прогнозування значень техніко-економічних показників проєктів реконструкції промислових одноповерхових будівель отримано кількісні значення факторів, які здійснюють найбільший вплив на техніко-економічні показники, та моделюванням зв'язку між досліджуваними показниками та факторами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Грабовецький Б. Є. Методи експертних оцінок : теорія, методологія, напрямки використання : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2010. 171 с.
2. Державна служба статистики. Статистична інформація. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/>
3. Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на листопад 2024 року. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/02/KSE_Damages_Report-November-2024-UA.pdf.
4. Структурні зміни та виклики в будівельній індустрії України: аналіз та прогнози. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/09/02_09_24_Zvit_Strukturni_zmini_ta_vikliki_v_budivel'niy-industrii--pdf.

REFERENCES

1. Grabovetsky B.E. *Metody ekspertnykh otsinok : teoriya, metodolohiya, napryamky vykorystannya : monohrafiya* [Methods of expert assessments : theory, methodology, direct research : monograph]. Vinnytsia: VNTU Publ., 2010, 171 p. (in Ukrainian).
2. *Derzhavna sluzhba statystyky. Statystychna informatsiya* [State Statistics Service. Statistical information]. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (in Ukrainian).
3. *Zvit pro pryami zbytky infrastruktury vid ruynuvan' vnaslidok viys'kovoyi ahresiyi Rosiyi proty Ukrayiny stanom na lystopad 2024 roku* [This is about the direct disruption of infrastructure due to the collapse as a result of the military aggression of Russia against Ukraine, which is expected to fall in the fall of 2024]. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/02/KSE_Damages_Report-November-2024-UA.pdf (in Ukrainian).
4. *Strukturni zminy ta vyklyky v budivel'niy industriyi Ukrayiny: analiz ta prohnozy* [Structural changes and changes in the construction industry of Ukraine: analysis and forecasts]. URL: [https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/09/02_09_24_Zvit_Strukturni_zminy_ta_vikliki_v_budivel'niy-industrii--pdf](https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/09/02_09_24_Zvit_Strukturni_zmini_ta_vikliki_v_budivel'niy-industrii--pdf) (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 12.08.2025.

УДК 69.05:69.003.13:624.05

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.241225.130.1216

ДОСЛІДЖЕННЯ ТРУДОМІСТКОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ЯК ОСНОВИ ОПТИМІЗАЦІЇ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ СПОРУДЖЕННЯ БУДІВЕЛЬ

МАТЮШЕНКО С. Ю.^{1*}, асп.,

СОКОЛОВ І. А.², докт. техн. наук, проф.

^{1*} Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.+38 (098) 206-68-91, e-mail: sergov.matyushenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4434-6006

² Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.+38 (067) 628 77 77, e-mail: sokolov.igor@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8366-4301

Анотація. Постановка проблеми. Сучасне будівництво стикається з низкою глобальних викликів, серед яких особливе місце посідають зростаючі вимоги до енергоефективності, раціонального використання ресурсів та підвищення продуктивності праці. Для України ці завдання набувають особливої актуальності у контексті необхідності відновлення та модернізації будівельного фонду, що потребує пошуку нових підходів до оптимізації організаційно-технологічних рішень спорудження будівель. Важливим напрямом такого удосконалення є зменшення витрат енергоресурсів у поєднанні з оптимізацією трудових ресурсів, оскільки саме ці фактори безпосередньо впливають на загальну ефективність, економічність та екологічність реалізації будівельних проєктів. Одним із перспективних способів досягнення поставлених цілей є аналіз трудомісткості основних будівельних процесів, що дозволяє виявити залежності між конструктивними та технологічними рішеннями і фактичними витратами праці. Саме у цьому контексті було проведене дане дослідження, яке спрямоване на визначення закономірностей формування трудомісткості будівництва та обґрунтування шляхів оптимізації організаційно-технологічних рішень із урахуванням мінімізації витрат енергоресурсів. **Мета статті.** Дослідження взаємозв'язку між трудомісткістю виконання основних етапів будівництва та організаційно-технологічними рішеннями, а також виявлення закономірностей, які дозволяють оптимізувати процес спорудження будівель із урахуванням мінімізації витрат енергоресурсів. **Висновок.** За результатами проведеного дослідження виявлені важливі закономірності та фактори, що впливають на трудомісткість будівельних процесів, а також виявлено закономірності між видами робіт та трудомісткістю та сформовано пропозиції, спрямовані на підвищення ефективності управління будівельним виробництвом. Отримані результати свідчать про можливість прогнозування трудових витрат на етапі проєктування в залежності від обраних будівельних рішень та технології виконання робіт. Це створює підґрунтя для ефективної оптимізації організаційно-технологічних рішень спорудження будівель із урахуванням мінімізації витрат енергоресурсів. Таким чином, результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення календарного планування, визначення потреби у трудових ресурсах та формування стратегій оптимізації будівельних процесів.

Ключові слова: трудомісткість; будівельні процеси; організаційно-технологічні рішення; оптимізація; енергоефективність; витрати енергоресурсів; прогнозування; конструктивні рішення; управління будівельним виробництвом; планування ресурсів

RESEARCH ON THE LABOR INTENSITY OF CONSTRUCTION PROCESSES AS THE BASIS FOR OPTIMIZING ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR BUILDING CONSTRUCTION

MATIUSHENKO S. Yu.^{1*}, Postgrad. Stud.,

SOKOLOV I. A.², Dr. Sc. (Tech.), Prof.

^{1*} Department of Organisation and Management in Construction, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.+38 (098) 206-68-91, e-mail: sergov.matyushenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4434-6006

² Department of Organisation and Management in Construction, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.+38 (067) 628-77-77, e-mail: sokolov.igor@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8366-4301

Abstract. Statement of the problem. Modern construction faces a number of global challenges, among which growing demands for energy efficiency, rational use of resources, and increased labor productivity occupy a special place. For Ukraine, these tasks are particularly relevant in the context of the need to restore and modernize the building stock, which requires the search for new approaches to optimizing organizational and technological solutions for the construction of buildings. An important direction for such improvement is the reduction of energy consumption in combination with the optimization of labor resources, since these factors directly affect the overall efficiency, cost-effectiveness, and environmental friendliness of construction projects. One of the promising ways to achieve these goals is to analyze the labor intensity of the main construction processes, which allows identifying the relationships between design and technological solutions and actual labor costs. It is in this context that this study was conducted, which aims to identify the patterns of labor intensity in construction and justify ways to optimize organizational and technological solutions, taking into account the minimization of energy consumption. **Purpose of the article.** To study the relationship between the labor intensity of the main stages of construction and organizational and technological solutions, as well as to identify patterns that allow optimizing the process of building construction, taking into account the minimization of energy costs. **Conclusion.** The results of the study revealed important patterns and factors that affect the labor intensity of construction processes, as well as patterns between types of work and labor intensity, and formed proposals aimed at improving the efficiency of construction management. The results obtained indicate the possibility of forecasting labor costs at the design stage depending on the selected construction solutions and work execution technology. This creates a basis for the effective optimization of organizational and technological solutions for the construction of buildings, taking into account the minimization of energy costs. Thus, the results of the study can be used to improve scheduling, determine labor resource requirements, and develop strategies for optimizing construction processes.

Keywords: *labor intensity; construction processes; organizational and technological solutions; optimization; energy efficiency; energy consumption; forecasting; design solutions; construction management; resource planning*

Постановка проблеми. Сучасна будівельна галузь перебуває під впливом численних глобальних викликів, серед яких особливої ваги набувають підвищені вимоги до енергоефективності, раціонального використання матеріальних та трудових ресурсів, а також зростання продуктивності праці. В українських умовах ці питання є надзвичайно актуальними через необхідність відновлення та оновлення будівельного фонду, що потребує впровадження нових підходів до вибору й удосконалення організаційно-технологічних рішень у процесі зведення будівель. Ключовим напрямом такої оптимізації є скорочення енергетичних витрат у поєднанні з ефективним аналізом та використанням трудовитрат, адже саме ці чинники визначають рівень економічності, ефективності та екологічності реалізації будівельних проєктів. Одним із дієвих інструментів досягнення зазначених завдань виступає аналіз трудомісткості будівельних процесів, що відкриває можливості для встановлення залежностей між конструктивно-технологічними рішеннями та фактичними трудовими витратами. У цьому контексті проведено дослідження спрямоване на виявлення закономірностей формування трудомісткості та

обґрунтування підходів до оптимізації організаційно-технологічних рішень спорудження будівель із врахуванням мінімізації витрат енергоресурсів.

Метою статті є дослідження взаємозв'язку між трудомісткістю виконання основних етапів будівництва та організаційно-технологічними рішеннями, а також виявлення закономірностей, які дозволяють оптимізувати процес спорудження будівель із урахуванням мінімізації витрат енергоресурсів. Для досягнення цієї мети здійснено аналіз трудомісткості основних видів робіт (земляних, фундаментних, стінових, покрівельних, фасадних та монтажу віконних блоків) на прикладі фактично реалізованих об'єктів різних функціональних типів. Особливу увагу приділено визначенню факторів, що найбільш суттєво впливають на формування трудових витрат, зокрема геометричних характеристик будівель та конструктивних рішень. Крім того, у роботі проведено порівняння різних технологічних підходів – монолітних та збірних фундаментів, цегляних та газобетонних стін, плоских та скатних покрівель, «мокрих» та вентилязованих фасадів – з точки зору їх трудомісткості та організаційно-

технологічних особливостей. Завершальним етапом дослідження стало формування практичних висновків щодо доцільності застосування окремих конструктивно-технологічних рішень у сучасному будівництві з урахуванням мінімізації трудових і енергетичних витрат.

Методи дослідження. Методологічною основою дослідження стала база даних, сформована на основі фактично реалізованих будівельних об'єктів трьох функціональних типів – амбулаторій первинної медичної допомоги, малих групових будинків для дітей, позбавлених батьківського піклування, та дошкільних навчальних закладів. Сукупність восьми об'єктів дозволила забезпечити репрезентативність вибірки та врахувати різноманітність архітектурно-планувальних і конструктивних рішень.

Для оцінки трудомісткості будівельних процесів застосовувався метод визначення питомих показників, тобто розрахунок трудових витрат у люд.-днях на одиницю обсягу виконаних робіт (1 м³ земляних робіт чи фундаментів, 1 м² стін, покрівлі, фасадів або встановлення віконних блоків). Проведено нормалізацію основних кількісних змінних і побудовано матрицю розподілу параметрів по об'єктах.

Аналіз публікацій. Дослідження трудомісткості будівельних процесів та оптимізації організаційно-технологічних рішень охоплює широкий спектр аспектів, пов'язаних із підвищенням продуктивності праці, раціональним використанням ресурсів та впровадженням енергоефективних технологій. У науковій літературі особливу увагу приділено методам прогнозування трудових витрат і пошуку шляхів їх оптимізації в умовах сучасних викликів будівельної галузі. У статті «Duration and Labor Resource Optimization for Construction Projects-A Conditional-Value-at-Risk-Based Analysis» [1] автори досліджують оптимізацію трудових ресурсів у висотному будівництві за допомогою методу Takt-time planning (метод організації будівельних процесів, що базується на принципі ритмічного

виконання робіт у повторюваних інтервалах часу (тактів), завдяки чому забезпечується узгодженість дій різних бригад і скорочення тривалості проекту) у поєднанні з симуляційним моделюванням та підходами VaR/CVaR (кількісні показники оцінки ризику, що дозволяють визначити потенційні втрати або відхилення у виконанні робіт. У будівництві ці методи застосовуються для врахування ймовірності затримок і вибору оптимального сценарію організації виробництва) для оцінки ризиків. На основі 1672 спостережень показано, що навіть без додаткових ресурсів можна скоротити тривалість проекту на 20,2 % і трудові витрати на 2,1 %. Дослідження демонструє ефективність інтеграції цифрового моделювання й ризик-менеджменту для підвищення продуктивності будівельних процесів[1].

У статті «Mitigating the Energy Consumption and the Carbon Emission in the Building Structures by Optimization of the Construction Processes» автори розглядають проблему високого рівня енергоспоживання та викидів CO₂ у будівельній галузі й пропонують підхід до їх зменшення шляхом оптимізації будівельних процесів. Особливу увагу приділено застосуванню lean-технік (Value Stream Mapping, Just-in-Time, Total Productive Maintenance, Continuous Flow [2]) у поєднанні зі структурною оптимізацією для підвищення ефективності виробництва, транспортування й монтажу будівельних конструкцій. Автори аналізують енергетичні витрати на прикладі різних матеріалів і процесів, зокрема виробництва бетону, сталі, транспортування та обслуговування, а також показують, що «мокрі» традиційні методи будівництва створюють значні енергетичні втрати. Водночас lean-методи дозволяють виявити «нецінні» операції та мінімізувати прості й надмірне споживання енергії [2].

Результатом роботи стало формування уніфікованого алгоритму, який поєднує структурну оптимізацію, lean-менеджмент і методологію оцінки життєвого циклу (LCA). Запропонований підхід дозволяє істотно знизити енергоспоживання та викиди CO₂ на

етапі будівництва, підвищуючи загальну сталість і конкурентоспроможність будівельних проєктів [2].

Виклад основного матеріалу.

Дослідження ґрунтується на аналізі восьми будівельних об'єктів соціальної інфраструктури, серед яких три амбулаторії первинної медичної допомоги, три малі групові будинки для дітей, позбавлених батьківського піклування, та два дошкільні навчальні заклади. Вибір саме цих об'єктів обумовлений їх соціальною значущістю, типовими архітектурно-планувальними характеристиками та різноманітністю конструктивно-технологічних рішень, що

дозволяє комплексно оцінити трудомісткість будівельних процесів. До складу вибірки увійшли наступні об'єкти розташовані у Дніпропетровській області: амбулаторія в с. Коломійці (рис. 1), амбулаторія в с. Могилів (рис. 2), амбулаторія в с. Девладове (рис. 3), груповий будинок у с. Петрівка (рис. 4), груповий будинок у с. Вакулове (рис. 5), груповий будинок у м. Кривий Ріг (рис. 6), дошкільний навчальний заклад на 80 місць у с. Старі Кодаци (рис. 7) та дошкільний навчальний заклад на 115 місць у м. Покров (рис. 8).



Рис. 1. Амбулаторія на 1 лікаря з житлом (с. Коломійці, Дніпропетровська обл.)



Рис. 2. Амбулаторія на 2 лікаря без житла (с. Могилів, Дніпропетровська обл.)



Рис. 3. Амбулаторія на 1 лікаря з житлом (с. Девладове, Дніпропетровська обл.)



Рис. 4. Груповий будинок (с. Петрівка, Дніпропетровська обл.)



Рис. 5. Груповий будинок (с. Вакулове, Дніпропетровська обл.)



Рис. 6. Груповий будинок (м. Кривий Ріг, Дніпропетровська обл.)



Рис. 7. ДНЗ на 80 місць
(с. Старі Кодаки, Дніпропетровська обл.)



Рис. 8. ДНЗ на 115 місць
(м. Покров, Дніпропетровська обл.)

Проведення кореляційного аналізу.

По-перше, було визначено коефіцієнти кореляції Пірсона між загальною трудомісткістю робіт та нормованими геометричними характеристиками будівель [3]. Виявлено високий рівень взаємозв'язку: для площі забудови $r = 0,962$, для об'єму будівлі $r = 0,937$, для умовної поверховості $r = 0,877$. Це підтверджує, що геометричні параметри мають суттєвий вплив на трудові витрати й можуть використовуватися як прогнозні змінні.

По-друге, з урахуванням отриманих кореляційних зв'язків здійснено підбір адекватних регресійних моделей. Найкращими виявилися: експоненційна залежність трудомісткості від нормованої поверховості, лінійна модель для площі забудови та функція із квадратним коренем для об'єму будівлі [4]. Значення коефіцієнтів детермінації ($R^2 = 0,83-0,93$) засвідчили, що вибрані функції адекватно відображають реальні тенденції та можуть застосовуватися для прогнозування.

По-третє, проведено аналіз частотних розподілів організаційно-технічних ознак. Вибірка виявилася нерівномірною: більшість становлять об'єкти на суглинкових ґрунтах, одно- та двоповерхові будівлі з плоскими покрівлями, а також громадські споруди з «мокрим» фасадом і металопластиковими вікнами. Це означає, що саме такі параметри добре відображені у дослідженні, тоді як інші характеристики – наприклад, скатні покрівлі, вентилязовані фасади чи альтернативні типи заповнення прорізів – трапляються поодинокі і представлені обмежено. Відповідно, результати аналізу є найбільш

репрезентативними для типових рішень, тоді як для менш поширених варіантів вони мають ілюстративний характер.

У підсумку виконаний статистичний аналіз дозволив структурувати вихідні дані, визначити ключові фактори та підібрати адекватні математичні моделі для прогнозування трудомісткості. Частотний і критерійний аналізи доповнили картину, показавши репрезентативність вибірки та потенційні обмеження при подальшій інтерпретації результатів.

Збір та систематизація даних про трудомісткість. На цьому етапі дослідження здійснювався збір вихідної інформації, необхідної для кількісного аналізу трудових витрат у будівельному процесі. Основна увага була зосереджена на визначенні трудомісткості тих видів робіт, які формують основу зведення будівлі та найбільшою мірою відображають вплив конструктивно-технологічних рішень. До них належать: земляні роботи, фундаментні роботи, зведення стін, улаштування покрівлі, монтаж віконних блоків та фасадні роботи. Відібрані види робіт були визначені як найважливіші за результатами експертного оцінювання, проведеного робочою групою фахівців у галузі будівництва. Для забезпечення об'єктивності відбору застосовано метод рангових матриць попарних порівнянь факторів, що дозволило виділити найбільш вагомі процеси для подальшого аналізу. Для кожного з відібраних об'єктів ці дані отримано на основі проектно-кошторисної та виконавчої документації, що забезпечило достовірність і порівнюваність результатів (табл. 1).

Після узагальнення фактичних даних щодо загальної трудомісткості виконання будівельно-монтажних робіт на об'єктах різного функціонального призначення проведено розрахунки питомих трудовитрат

– тобто, трудомісткість на одиницю обсягу виконаної роботи (наприклад, люд.-дні на 1 м² покрівлі, фасаду, або 1 м³ земляних робіт) (табл. 2).

Таблиця 1

Фрагмент таблиці трудомісткості основних видів робіт по перших чотирьох об'єктах нового будівництва

№ п/п	Вид робіт	Об'єкт 1 – Трудомісткість (люд.-днів)	Об'єм робіт	Об'єкт 2 (люд.-днів)	Об'єм робіт	Об'єкт 3 (люд.-днів)	Об'єм робіт	Об'єкт 4 (люд.-днів)	Об'єм робіт
1	Земляні роботи	98,41	1503 м ³	1,26	669 м ³	64,97	1033 м ³	95,29	1843,2 м ³
2	Фундаментні роботи	80,24	122,908 м ³	36,86	79,54 м ³	62,497	121,543 м ³	99,65	178 м ³
3	Зведення стін	194	175,9 м ³	133	120 м ³	194	175 м ³	169,36	153,76 м ³
4	Покрівельні роботи	136,435	384 м ²	109,42	281 м ²	136	384 м ²	157	336 м ²
5	Установка віконних блоків, вітражів	6,03	60,6 м ²	4,12	42,6 м ²	4,91	45,36 м ²	6,9	48,1 м ²
6	Фасади	197	330 м ²	154,75	248 м ²	116,12	422 м ²	256	422,5 м ²

Таблиця 2

Питомі показники трудомісткості будівельних робіт (люд.-дні на одиницю обсягу)

№	Назва об'єкта	Земляні роботи (люд.-днів/м ³)	Фундаментні роботи (люд.-днів/м ³)	Зведення стін (люд.-днів/м ³)	Покрівельні роботи (люд.-днів/м ²)	Установка вік. (люд.-днів/м ²)	Фасади (люд.-днів/м ²)
1	Амбулаторія в с. Коломійці	0,0654	0,652	1,102	0,355	0,0995	0,596
2	Амбулаторія в с. Могилів	0,00188	0,463	1,108	0,389	0,0967	0,623
3	Амбулаторія в с. Девладове	0,0628	0,5142	1,1085	0,354	0,108	0,275
4	Груповий будинок в с. Петрівка	0,0516	0,559	1,101	0,467	0,143	0,605
5	Груповий будинок в с. Вакулове	0,0505	0,5401	1,097	0,4404	0,124	0,597
6	Груповий будинок в м. Кривий Ріг,	0,0095	0,7373	1,106	0,591	0,170	0,599
7	ДНЗ на 80 місць (с. Старі Кодаки,	0,0534	1,493	0,643	0,37	0,115	0,313
8	ДНЗ на 115 місць (м. Покров	0,0633	0,7535	0,739	0,42	0,113	0,311

Наведені у таблиці 2 питомі показники відображають фактичні трудові витрати за основними видами будівельних робіт у

розрахунку на одиницю обсягу (люд.-дні на 1 м² чи 1 м³) для кожного з досліджуваних об'єктів. Такий підхід дозволяє зіставляти

між собою різні будівлі незалежно від їхніх геометричних характеристик та загального обсягу робіт, а також робити висновки щодо впливу конструктивно-технологічних рішень на трудомісткість. Попередній аналіз свідчить, що частина процесів характеризується відносною сталістю трудових витрат (наприклад, земляні роботи та встановлення віконних блоків), тоді як для інших (фундаментні, стінові, покрівельні та фасадні роботи) спостерігаються суттєві відхилення.

Результати досліджень. Аналіз результатів показує, що виконання земляних робіт на досліджуваних об'єктах відзначається відносною стабільністю трудових витрат: середні значення залишаються близькими та не демонструють різких відхилень. Це обумовлено уніфікованістю технології, яка залежить переважно від обсягів розробки ґрунту та його переміщення, тоді як архітектурно-конструктивні характеристики будівель не мають вирішального значення. Водночас зафіксовані випадки, коли показники виявилися нижчими від середніх. Зокрема, під час спорудження амбулаторії в с. Могилів та групового будинку в м. Кривий Ріг значну частину земляних робіт виконували субпідрядні організації із залученням екскаваторів і транспортних засобів, орендованих разом із обслуговчим персоналом. У кошторисах генпідрядника було відображено лише витрати на допоміжний персонал, що призвело до формального заниження трудомісткості у порівнянні з іншими об'єктами.

Подібний підхід має як переваги, так і недоліки. З економічної точки зору він дозволяє зменшити витрати на утримання власної техніки та механізаторів, а також прискорити темпи виконання завдяки спеціалізації субпідрядників. Проте при цьому втрачається точність відображення реальних трудових витрат і зростає залежність від сторонніх організацій.

Отже, відмінності у показниках трудомісткості земляних робіт пояснюються насамперед організаційними чинниками, а не особливостями конструктивних рішень

будівель. Це підкреслює важливість комплексного аналізу трудових витрат, який має враховувати як кількісні дані, так і умови організації виробництва.

На відміну від земляних робіт, трудомісткість виконання фундаментних робіт виявила істотні коливання між різними об'єктами. Такі відмінності пояснюються не лише архітектурно-конструктивними рішеннями, а й особливостями організації будівництва.

У випадку амбулаторій у селах Могилів та Девладове нижчі показники пояснюються тим, що підйомні механізми та транспортні засоби (зокрема кран на гусеничному ході та вантажний автомобіль) були залучені в оренду. У результаті частина робіт фактично виконувалася субпідрядними організаціями, тоді як у кошторисах генпідрядника відображались лише допоміжні витрати. Це призвело до формального зменшення трудових показників у порівнянні з іншими об'єктами.

Протилежна ситуація спостерігалася у груповому будинку в м. Кривий Ріг та ДНЗ у м. Покров, де більшу частку становили роботи з бетонною підготовкою. На відміну від монтажу готових блоків, цей процес потребує приготування, укладання та витримання суміші, що суттєво підвищує трудомісткість.

Найбільш трудомістким виявився об'єкт у с. Старі Кодаки, де фундамент реалізовано паливим способом. Заглиблення понад 400 залізобетонних паль довжиною більше 20 м у ґрунтах другої групи та вирубування арматурних каркасів призвели до істотного зростання витрат праці.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що трудомісткість фундаментних робіт формується поєднанням двох чинників — типу застосованих конструктивних рішень (стрічкові, пальові, збірні блоки чи бетонна підготовка) та організаційних умов (використання орендованої техніки чи власних ресурсів). Використання готових фундаментних блоків у більшості випадків дозволяє скоротити витрати праці й прискорити темпи будівництва, проте таке рішення супроводжується низкою

обмежень, пов'язаних із логістикою, потребою у вантажопідіймальній техніці та обмеженням гнучкості проєктних рішень. Тому вибір між збірними та монолітними фундаментами має здійснюватися з урахуванням специфіки об'єкта та геологічних умов будівельного майданчика.

Аналіз трудових витрат на зведення стін показав, що для більшості об'єктів вони залишаються у межах середніх значень і не мають суттєвих коливань. Виняток становлять два дошкільні навчальні заклади – у Старих Кодаках та м. Покрові, де трудомісткість виявилася нижчою за рахунок специфіки конструктивних рішень. Якщо в амбулаторіях та групових будинках застосовувалася традиційна цегляна кладка з керамічної цегли при поверховості до 4 метрів, то у дитячих закладах було обрано іншу модель – монолітно-каркасну, де стіни виконані з газобетонних блоків UDK PowerBlock 600 (зовнішні – товщиною 400 мм, внутрішні – 300 мм). У таких будівлях несучу функцію виконують колони та перекриття, а стіни мають огорожувальне й теплоізоляційне призначення, що дозволяє використовувати легші матеріали.

Газоблоки забезпечують економію трудових ресурсів, адже один блок замінює кілька цеглин, має меншу масу та точні розміри, що полегшує процес мурування й прискорює виконання робіт. Натомість цегляна кладка є значно більш трудомісткою через більший обсяг операцій і потребу в ретельному контролі якості, хоча саме цегла гарантує вищу міцність, довговічність і здатність виконувати несучі функції.

Таким чином, виявлені відмінності у трудомісткості стінових робіт пояснюються двома чинниками: по-перше, різницею в матеріалі (цегла або газоблок), а по-друге, конструктивною схемою будівлі (традиційна або каркасна). У каркасних будівлях трудові витрати на стіни нижчі, оскільки вони не є несучими і можуть бути виконані з матеріалів, що простіші в укладанні.

Розраховані значення трудомісткості покрівельних робіт свідчать про відносну стабільність показників на більшості об'єктів, де вони коливаються у межах середніх величин. Винятком став груповий будинок у м. Кривий Ріг, де трудові витрати досягли 0,591 люд.-днів/м², що суттєво перевищує середній рівень інших будівель (0,35–0,47 люд.-днів/м²).

Основна причина цього полягає у різних конструктивних підходах до улаштування покрівлі. На більшості будівель було застосовано традиційну пласку рулонну систему з руберойду з утепленням плитами екструдованого пінополістиролу, похилоутворюючим шаром із пінополістиролбетону та армованою стяжкою. Ця технологія відзначається відпрацьованістю, простотою та меншими витратами праці.

Натомість у груповому будинку в Кривому Розі реалізовано двоскатний дах із профільованого листа ПК-44, що потребувало значно більшого обсягу робіт. Виконання включало виготовлення та монтаж крок'яної системи, укладання брусів, улаштування контррейки, гідроізоляції та монтаж покрівельного покриття. Окрім цього, процес ускладнювався наявністю великої площі похилих площин і виступаючих елементів, що вимагало додаткових трудових витрат і підвищених заходів безпеки.

Таким чином, результати показують, що на трудомісткість покрівельних робіт визначально впливає не стільки площа даху, скільки його конструктивна схема та застосовані матеріали. Пласкі рулонні системи є оптимальними для громадських будівель типового проєктування завдяки простоті монтажу та відносно низьким витратам праці. Скатні дахи, хоча й більш трудомісткі, забезпечують кращу архітектурну виразність, надійність водовідведення та довговічність, що робить їх доцільними для житлових і малоповерхових будівель. Додатково слід враховувати, що матеріали покриття та умови виконання робіт (зокрема вимоги до

безпеки при монтажі на висоті) можуть суттєво змінювати трудові витрати.

Розрахунки показали, що трудомісткість установлення віконних блоків на досліджених об'єктах практично не відрізняється: значення варіюють у межах 0,097–0,170 люд.-днів/м² при середньому показнику близько 0,12 люд.-днів/м². Це підтверджує високий рівень уніфікації даного виду робіт.

У всіх випадках застосовувались металопластикові блоки з ПВХ-профілю, обладнані двокамерними склопакетами товщиною 32 мм з енергозберігаючим склом. Стандартизовані характеристики виробів і типова технологія монтажу забезпечили сталість трудових витрат. Невеликі відмінності пояснюються переважно конструктивними умовами об'єктів — кількістю й розмірами прорізів, поверховістю будівлі та доступністю робочих зон.

Отже, трудомісткість монтажу віконних блоків визначається не стільки типом будівлі, скільки стандартизованою технологією виконання. Використання готових ПВХ-конструкцій забезпечує істотну економію праці порівняно з традиційними дерев'яними рамами та дозволяє підтримувати стабільний рівень витрат незалежно від специфіки будівлі.

Отримані результати свідчать, що фасадні роботи є найбільш варіативними за трудомісткістю серед усіх досліджених процесів і значною мірою залежать від застосованої технології. У більшості випадків використовувалася система «мокрого фасаду» з утепленням мінераловатними плитами товщиною 150 мм, подальшим нанесенням армувального та декоративного шарів і завершальним фарбуванням. Трудові витрати для такої технології залишаються стабільними й перебувають у межах 0,60 люд.-днів/м², однак сам процес є багатоступеневим і потребує значних витрат часу. Крім того, «мокрі» фасади суттєво залежать від погодних умов, що ускладнює їх виконання в осінньо-зимовий період.

Іншу картину демонструють об'єкти з вентиляльованими фасадними системами (амбулаторія в с. Девладове, ДНЗ у Старих Кодаках та м. Покрові). Тут трудомісткість коливається у межах 0,28–0,31 люд.-днів/м², тобто майже вдвічі нижча порівняно з «мокрими» технологіями. Пояснюється це тим, що більшість операцій виконується сухим методом — монтаж утеплювача та облицювання без трудомісткого нанесення розчинів. Це дає можливість проводити роботи у холодний період року, зменшує вплив погодних факторів і прискорює реалізацію фасадних робіт.

Разом із тим, вентиляльовані фасади вимагають складніших технологічних рішень, дорожчих матеріалів і більш організованої логістики. Проте вони мають кращі показники довговічності, забезпечують вищий рівень енергоефективності та спрощують експлуатаційне обслуговування, оскільки пошкоджені елементи облицювання можуть бути замінені окремо.

Таким чином, обрана система фасаду визначає не лише обсяг трудових витрат, але й сезонність виконання, тривалість будівництва та подальші експлуатаційні характеристики будівлі. «Мокрі фасади» залишаються економічно привабливим рішенням для об'єктів із обмеженим бюджетом, тоді як вентиляльовані системи забезпечують сучасні вимоги до комфорту й енергоефективності, хоча й потребують більших початкових витрат.

У лютому 2018 року для дошкільного навчального закладу в с. Малки проектною документацією було передбачено влаштування вентиляльованих фасадів із застосуванням системи термофасадів CERESIT MB. Технологія включала утеплення вертикальних стін із дрібноштучних матеріалів мінераловатними плитами товщиною 120 мм із подальшим облицюванням фасадною керамічною плиткою з риштувань. Орієнтовна кошторисна вартість таких робіт на момент проектування становила 946 300 грн.

Однак станом на серпень 2019 року, коли будівництво перейшло до етапу

фасадних робіт, замовник ініціював коригування проєкту, у рамках якого було прийнято рішення замінити вентилявану систему на традиційний «мокрый» штукатурний фасад. Вартість цих робіт за оновленою документацією зменшилася до 774 079 грн. Важливо врахувати, що між первинним проєктуванням і фактичним виконанням робіт минуло близько півтора року, і за цей час ринкова ціна на вентилявані системи також зросла б, що зробило б їх ще дорожчими у порівнянні з кошторисом 2018 року.

Додатковим фактором, який сприяв такому рішенню, стали сприятливі літні умови. Оскільки черга на фасадні роботи настала влітку, технологічних перешкод для виконання «мокрих» процесів не існувало. Не було потреби в економії трудовитрат у люд.-днях, адже погодні умови дозволяли безперешкодно реалізувати більш трудомістку, але дешевшу технологію. Це посилює аргументацію на користь економії бюджетних коштів. Таким чином, рішення про заміну фасадної системи мало комплексні наслідки. Передусім воно дозволило зекономити понад 170 тис. грн, що становить близько 18 % від початкової вартості фасадних робіт, і стало вагомим економічним аргументом. З організаційно-технологічної точки зору, хоча «мокрі» фасади потребують більших трудових витрат, виконання робіт у літній період зробило цю обставину не критичною, а відсутність необхідності у складній логістиці спростила процес будівництва. Важливим чинником було й те, що за півтора року від моменту проєктування до фактичного виконання вартість вентиляваних систем зросла, що робило їх застосування ще менш доцільним. Водночас слід зазначити, що вентилявані фасади забезпечують вищі експлуатаційні та енергоефективні характеристики, однак у даному випадку замовник віддав перевагу економії бюджетних ресурсів і дотриманню календарних строків. Цей приклад наочно

демонструє, як у процесі тривалого будівництва можливим є впровадження оптимізаційних та економічно вигідних рішень для замовника, що враховують змінні зовнішні фактори, які не завжди можна передбачити на стадії проєктування.

Висновок

Отримані результати мають практичне значення для вдосконалення управління будівельним виробництвом. Виявлені закономірності свідчать про те, що вже на стадії проєктування можливо оцінювати майбутні трудові витрати з урахуванням типу споруди, обраних конструктивних рішень та технологій виконання робіт. Це створює підґрунтя для більш раціонального вибору альтернативних варіантів організації будівельних процесів з огляду не лише на матеріальні витрати, а й на трудомісткість, строки виконання та сезонні умови.

Таким чином, результати дослідження можуть використовуватися як інструмент прогнозування, що сприятиме підвищенню ефективності календарного планування, оптимізації залучення трудових ресурсів і формуванню стратегій удосконалення будівельного виробництва. Водночас отримані висновки потребують подальшого розвитку: необхідний більш глибокий аналіз взаємозв'язку між трудовитратами, енергетичними ресурсами та організаційно-технологічними чинниками, а також розширення вибірки об'єктів для підвищення надійності та універсальності результатів. Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка розрахункової математичної моделі, яка дозволить кількісно оцінювати енергоефективність різних будівельних процесів, а також створення алгоритму підтримки прийняття рішень для вибору оптимальних організаційно-технологічних рішень спорудження будівель із урахуванням мінімізації витрат енергоресурсів..

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ding F., Liu M., Hsiang S. M., Hu P., Zhang Y., Jiang K. Duration and Labor Resource Optimization for Construction Projects. A Conditional-Value-at-Risk-Based Analysis. *Buildings*. 2024. № 14 (2). Pp. 553. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14020553>
2. Tabrizikahou A., Nowotarski P. Mitigating the Energy Consumption and the Carbon Emission in the Building Structures by Optimization of the Construction Processes. *Energies*. 2021. № 14 (11). Pp. 3287. URL: <https://doi.org/10.3390/en14113287>
3. Куц Ю. В., Лисенко Ю. Ю. Статистичні методи визначення залежностей між випадковими величинами : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.
4. Бідюк П. І., Данилов В. Я., Жиров О. Л. Прикладна статистика : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023.

REFERENCES

1. Ding F., Liu M., Hsiang S.M., Hu P., Zhang Y. and Jiang K. Duration and Labor Resource Optimization for Construction Projects. A Conditional-Value-at-Risk-Based Analysis. *Buildings*. 2024, no. 14 (2), pp. 553. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14020553>
2. Tabrizikahou A. and Nowotarski P. Mitigating the Energy Consumption and the Carbon Emission in the Building Structures by Optimization of the Construction Processes. *Energies*. 2021, no. 14 (11), pp. 3287. URL: <https://doi.org/10.3390/en14113287>
3. Kuts Yu.V. and Lysenko Yu.Yu. *Statystychni metody vyznachennya zalezhnostey mizh vypadkovymy velychynamy: navch. posib.* [Statistical methods for determining dependencies between random variables : textbook]. Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2022. (in Ukrainian).
4. Bidyuk P.I., Danilov V.Ya. and Zhyrov O.L. *Prykladna statystyka : navch. posib.* [Applied Statistics : textbook]. Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2023. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 03.09.2025.

УДК 691.32:691.5:699.887

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.241225.141.1217

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ БЕТОНІВ ТА РОЗЧИНІВ ДЛЯ ЕКРАНУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ

САВИЦЬКИЙ М. В.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
ШЕХОРКІНА С. Є.², *докт. техн. наук, проф.*,
БОРДУН М. В.^{3*}, *докт. філософії, доц.*,
СМИРНОВ А. С.⁴, *докт. філософії*,
ЛЯСОТА О. В.⁵, *асп.*

¹ Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 745-23-72, e-mail: ms@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-3325-4675

² Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 021-84-44, e-mail: svitlana.shekhorkina@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7799-2250

^{3*} Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (098) 260-11-91, e-mail: bordun.maryna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-8539-2423

⁴ Лабораторія досліджень атомних та теплових електростанцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 983-67-59, e-mail: smyrnov.anton@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-2500-2323

⁵ Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (096) 483-03-73, e-mail: lyasota198422@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4269-2434

Анотація. Постановка проблеми. Сьогодні актуальними питаннями оборони і безпеки України є захист від дії електромагнітних полів штучного походження. Електромагнітні поля спричиняють збої в роботі обладнання, якості зв'язку. Існує можливість за допомогою спеціальної апаратури виявляти спецоб'єкти, втручатися в системи інформаційного та енергетичного забезпечення. Розвиваються технології зброї електромагнітної нейтралізації та ураження спрямованою енергією, яка може вивести з ладу системи управління критичної інфраструктури і оборони. Перспективним напрямом взаємодії з електромагнітними полями є стелс-технології малопомітності для запобігання виявлення військових об'єктів у радіолокаційному та інших спектрах. Пасивні засоби (екранування, радіопогинання) дають змогу забезпечувати ефективний захист приміщень, систем управління, оборонних об'єктів за електричною та магнітною складовими поля. **Мета статті** – аналіз сучасного стану науково-прикладної проблеми, постановка завдань та обґрунтування методології подальшого дослідження. **Висновки.** Завдання науково-дослідної роботи спрямовані на розробку наукових та експериментальних основ створення електропровідних бетонів і розсіюючих та радіопоглинаючих покриттів для екранування електромагнітних полів і стелс-технологій на основі вуглецево-цементних композитів, що забезпечать інформаційну безпеку та стійкість об'єктів і систем оборони, критичної інфраструктури, бойових машин і підвищать ступінь їх захисту та виживаності. Результати досліджень матимуть високу наукову цінність, оскільки полягатимуть у розвитку напряму створення високофункціональних композитів різного призначення. Беззаперечним також є практичне значення запланованих результатів для безпеки та обороноздатності країни при захисті і зменшенні вірогідності виявлення і враження оборонних об'єктів, об'єктів критичної інфраструктури, командних пунктів, бойових машин, забезпечення інформаційної безпеки об'єктів і систем управління і прийняття рішень.

Ключові слова: *електропровідність; бетон; розчин; вуглецево-цементні композити; електромагнітні поля*

METHODOLOGICAL PRINCIPLES FOR DEVELOPING ELECTRICALLY CONDUCTIVE CONCRETES AND MORTARS FOR ELECTROMAGNETIC FIELD SHIELDING

SAVYTSKYI M.V.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

SHEKHORKINA S.Yev.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BORDUN M.V.^{3*}, *PhD, Doc.*,
SMYRNOV A.S.⁴, *PhD*,
LYASOTA O.V.⁵, *Postgrad. Stud.*

¹ Department of Reinforced-Concrete and Masonry Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, 24-a Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 745-23-72, e-mail: ms@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-3325-4675

² Department of Reinforced-Concrete and Masonry Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.+38 (095) 021-84-44, e-mail: svitlana.shekhorkina@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7799-2250

^{3*} Department of Reinforced-Concrete and Masonry Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (098) 260-11-91, e-mail: bordun.maryna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-8539-2423

⁴ Department of Research of Nuclear and Thermal Power Plants, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 983-67-59, e-mail: smyrnov.anton@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-2500-2323

⁵ Department of Reinforced-Concrete and Masonry Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (096) 483-03-73, e-mail: lyasota198422@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4269-2434

Abstract. Problem Statement. Current pressing issues for Ukraine's defense and security include protection from the effects of artificially generated electromagnetic fields. Electromagnetic fields cause malfunctions in equipment and degrades communication quality. There is a potential for specialized equipment to detect special-purpose facilities and interfere with information and energy supply systems. Technologies for electromagnetic neutralization weapons and directed-energy weapons, capable of disabling control systems of critical infrastructure and defense, are being developed. The perspective area of interaction with electromagnetic fields involves stealth technologies for low observability to prevent the detection of military objects in radar and other spectra. Passive means (shielding, radio absorption) enable effective protection of premises, control systems, and defense installations against the electric and magnetic components of the field. **The article's purpose** is to analyze the current state of the scientific-applied problem, define tasks, and substantiate the methodology for further research. **Conclusions.** The tasks of the research are aimed at developing scientific and experimental foundations for creating electrically conductive concretes and dispersive/radio-absorbing coatings for shielding electromagnetic fields and for stealth technologies based on carbon-cement composites. These will ensure information security and resilience of defense objects and systems, critical infrastructure, and combat vehicles, enhancing their level of protection and survivability. The research results will possess high scientific value, as they will contribute to advancing the field of creating high-performance composites for various purposes. The practical significance of the planned results for the nation's security and defense capability is also undeniable, concerning the protection and reduction of the likelihood of detection and destruction of defense objects, critical infrastructure facilities, command posts, and combat vehicles, as well as ensuring the information security of objects, control, and decision-making systems.

Keywords: *electrical conductivity; concrete; mortar; carbon-cement composites; electromagnetic fields*

Постановка проблеми. Швидкий розвиток телебачення і радіозв'язку, мобільного стільникового зв'язку, Інтернету спричиняє дедалі більше «забруднення» довкілля електромагнітними полями. Наведені електромагнітні поля все частіше спричиняють збої в роботі ІТ-обладнання, впливають на якість зв'язку. Одночасно з цим, існує реальна можливість, за допомогою спеціальної апаратури, використовуючи побічні електромагнітні випромінювання та наведення електронних приладів, виявляти замасковані об'єкти, знімати конфіденційну інформацію з серверів, прослуховувати перемовини. Дією

високочастотного електромагнітного випромінювання можна втручатися в роботу систем інформаційного та енергетичного забезпечення, на канали передачі даних, контролю та управління, або навмисно знищувати дані на електронних носіях [1].

Однією з найбільших небезпек може бути дія електромагнітного імпульсу (ЕМІ, англ. *electromagnetic pulse, EMP*) трьох типів: 1) ядерного, 2) сонячного та 3) збройного – одномоментного вивільнення величезної кількості електромагнітної енергії. Висотний ядерний вибух створює миттєвий потік гамма-променів, що взаємодіють з магнітним полем Землі,

породжуючи коливальний електричний струм. Він спричиняє швидке зростання випромінюваного електромагнітного поля – ЕМІ. На сьогодні більш вірогідним є ЕМІ від сонячних спалахів (англ. *Solar Flare*) і корональними викидами маси (англ. *coronal mass ejection, CME*). Сонячний спалах і СМЕ призводять до того, що величезна кількість енергії або високоенергетичних частинок спрямовується до Землі. Корональний викид маси, що іноді називають «мега-сонячним спалахом», може бути руйнівним. ЕМІ-зброя не призначена для фізичного ураження людей, вона призначена для випромінювання електромагнітних імпульсів з метою виведення з ладу енергосистем або електричних пристроїв [2].

В світі стрімко розвиваються технології зброї електромагнітної нейтралізації та ураження спрямованою енергією. Значний сплеск енергії в вигляді ЕМІ може повністю вивести з ладу об'єкти і системи управління критичної інфраструктури і оборони (мережі зв'язку, системи GPS, мобільний зв'язок, бойові машини – автомобілі та транспортні засоби, літаки, кораблі, підводні човни і ракети, практично будь-який електричний пристрій). Наступний напрям, пов'язаний із взаємодією з електромагнітними полями – технологія малопомітності або стелс – технології (англ. *Stealth technology*) – комплекс засобів пасивної радіоелектронної протидії, яка охоплює низку методів, що застосовуються до бойових машин та військових об'єктів для зниження їх помітності у радіолокаційній, інфрачервоній та інших галузях спектра виявлення для підвищення виживаності.

На сьогодні актуальними питаннями оборони і безпеки України є засоби захисту від дії електромагнітних полів штучного походження. Екранування електромагнітних полів системами захисту є важливим завданням інформаційної безпеки, захисту приміщень, систем управління, забезпечення малопомітності бойових машин, оборонних об'єктів і т. п. Застосування пасивного захисту у вигляді електромагнітних екранів і

радіопоглинаючих покриттів, дає змогу вирішувати завдання ефективного захисту за електричною та магнітною складовими поля.

Для вирішення вищенаведених проблем, колектив ННІ ПДАБА УДУНТ виконує комплексну науково-дослідну роботу «Електропровідні бетони і розсіюючі та радіопоглинаючі покриття для екранування електромагнітних полів і стелс-технологій» (№ ДР 0125U001955).

На основі вивчення стану питання і існуючих результатів досліджень, в тому числі власних пошукових досліджень, в якості матеріалів для електромагнітних екранів і радіопоглинаючих покриттів авторами пропонуються електропровідні композиційні матеріали – бетони і покриття з використанням електропровідних вуглецевих наповнювачів, що вирізняються високою ефективністю дії, доступністю, простотою технології виконання, низькою вартістю. За ступенем важливості, новизною поставлених задач, обсягом, запланованими результатами такі дослідження в Україні виконуються вперше.

Мета статті – аналіз сучасного стану науково-прикладної проблеми, постановка завдань та обґрунтування методології дослідження.

Огляд публікацій. Останнім часом в світі стрімко розвиваються технології зброї електромагнітної нейтралізації та ураження спрямованою енергією (англ. *Directed-energy weapon, DEW*), електромагнітного імпульсу (англ. *Electromagnetic Pulse, EMP*) та високопотужної мікрохвильової зброї (англ. *High Powered Microwave (HPM) Weapons*), високопотужної мікрохвильової електромагнітної бомби (англ. *High Power Microwave Electromagnetic Bomb, HPM E-BOMB*) [3]. Це зброя у вигляді потужного мікрохвильового обладнання, що випромінює енергію у заданому напрямі, яка перенавантажує електронні системи, завдяки чому виводить їх з ладу.

Значний сплеск енергії в вигляді ЕМР може повністю вивести з ладу: електричну мережу, системи GPS, мобільний зв'язок, стаціонарні телефони, інтернет, автомобілі

та транспортні засоби, радіозв'язок, системи освітлення, практично будь-який електричний пристрій. Найбільш вразливими до імпульсів є системи управління, на яких працюють майже всі сучасні установки і об'єкти критичної інфраструктури, в тому числі: нафтопереробні заводи, трубопроводи, телефонні мережі, системи управління повітряним рухом, національні та місцеві електростанції, міські мережі водопостачання. Зважаючи на серйозність загроз від ЕМІ, в США розроблено системний документ і стандарти по захисту критичної інфраструктури (мережі зв'язку, транспортні системи, водоочисні споруди, аварійні служби, фінансові послуги) від його дії [4].

Всі системи захисту можливо поділити на активні і пасивні [5]. Активні методи захисту полягають у приховуванні інформативних сигналів за рахунок шумової чи загороджувальної перешкоди за допомогою генераторів шуму або постановників перешкод, наприклад клітки Фарадея [6]. У зв'язку з бурхливим розвитком у світі новітніх технологій і виробництв технічних засобів різного призначення, включно із засобами приймання-передавання та обробки інформації, активні технічні засоби захисту інформації швидко застарівають. При цьому більш потужна сучасна техніка не може не завдавати шкоди здоров'ю своїх користувачів.

Фізично обґрунтованим, надійним і одним із найдієвіших засобів пасивного захисту об'єкта від перелічених вище видів загроз є спеціальне екранування приміщень або застосування модульних екранованих кабін і кімнат [7]. Системи пасивного захисту діляться на ті, що відбивають вхідні імпульси (електромагнітний екран у вигляді сталевих, мідних, алюмінієвих листів, фольги, гнучкі композитні матеріали у вигляді сітки, тканини або плівки) і ті, що поглинають (електропровідні бетони, композитні матеріали, плівки). Як правило, матеріали які відбивають, є досить дорогими, тому екранування приміщень є

дорогим рішенням. Останнім часом з'явилися композиційні матеріали, які поглинають, що можуть бути ефективним і досить дешевим рішенням. За позірної зовнішньої простоти, це рішення дає змогу, за умови врахування особливостей поширення радіохвиль і кваліфікованого виконання екраноспороди, домогтися істотного ослаблення фонового сигналу. Крім того, захисне екранування приміщень дозволяє виключити шкідливий вплив на людину сильних електромагнітних полів від різних засобів електромагнітного випромінювання.

В якості матеріалів для електромагнітних екранів і радіопоглинаючих покриттів пропонуються електропровідні композиційні матеріали – бетони, розчини і покриття. Електропровідність у цих композитах забезпечується електропровідними компонентами (наповнювачами), які можливо об'єднати в дві групи: металічні і вуглецеві. В'язучі електропровідних композитів можна розділити на такі групи: полімерні, рідкоскляні, мінеральні [8]. Відомі результати досліджень в Україні електропровідних покриттів для захисту від корозії [9], композитних радіопоглинаючих структур для створення протирадіолокаційних покриттів повітряних об'єктів з метою захисту від радіолокаційних систем виявлення і розпізнавання [10]. На сьогодні достатнього обґрунтування вибору електропровідних наповнювачів і в'язучих для створення електропровідних бетонів не існує, як не існує і стандартів на тестування електропровідності наповнювачів і композиційних матеріалів. Необхідна їх розробка. Окремі пропозиції з цих питань були запропоновані в роботах авторів [11–13]. Одні з перших досліджень за стандартними методиками електропровідних бетонів як захисту від електромагнітних полів були проведені в США [14]. На сьогодні такі дослідження інтенсивно проводяться в КНР [15–17] та інших країнах.

На основі вивчення стану питання і

існуючих публікацій, в тому числі власних пошукових досліджень, в якості матеріалів для електромагнітних екранів і радіопоглинаючих покриттів авторами пропонуються електропровідні композиційні матеріали – бетони, розчини і покриття з використанням електропровідних вуглецевих наповнювачів, що вирізнятимуться високою ефективністю дії, доступністю, простотою технології виконання, низькою вартістю. Для цього необхідно провести комплекс експериментально-теоретичних досліджень, направлених на розробку: композиційних електропровідних бетонів і покриттів, методів дослідження електропровідності наповнювачів і композитів, методів дослідження захисних властивостей бетонів і покриттів від дії електромагнітних полів, техніко-економічної оцінки застосування бетонів і покриттів. За ступенем важливості, новизною поставлених задач, обсягом, запланованими результатами такі дослідження в Україні виконуються вперше.

Методи та засоби, методика та методологія досліджень. Виходячи з проведеного аналізу можна зробити висновок, що на сьогодні існує розрізнена база даних щодо джерел випромінювання електромагнітних хвиль і їх характеристики – довжина хвиль і частота. Це відноситься до електромагнітних хвиль як природного, так і штучного походження. Необхідно узагальнити інформацію щодо розробок захисних композицій і методів дослідження захисної дії та запропонувати типологію електропровідних вуглецевих наповнювачів за величиною їх електропровідності і питомого опору, а також за властивостями поглинання електромагнітної дії.

Наступним етапом є проведення експериментальних досліджень для обґрунтування типів вуглецевих наповнювачів в'язучих для електропровідних розчинів і бетонів, а також розсіюючих та радіопоглинаючих покриттів. Передбачається тестування електропровідності типових зразків вуглецевих наповнювачів (технічна сажа, коксова дрібниця, графітова пудра,

вуглецева фібра) при зміні тиску і напруги електричного струму. Наповнювач буде навантажуватись через електропровідні пуансони, до яких буде прикладатися електричний струм певної напруги і замірятися електротехнічні характеристики матеріалу. За результатами оцінки експериментальних даних буде обґрунтовано вибір перспективних наповнювачів за критерієм найвищої електропровідності.

Подальші кроки передбачають проектування складів та експериментальні дослідження електропровідних розчинів і бетонів і покриттів з різними вуглецевими наповнювачами. Для цього буде розроблено та обґрунтовано методику підбору складів, технологічні рішення введення електропровідних гідрофобних і схильних до агрегації вуглецевих наповнювачів, визначені параметричні точки перколяції явища електропровідності композитів. Експериментальні дослідження електропровідності бетонів з різними вуглецевими наповнювачами передбачається проводити на стандартних зразках в лабораторних умовах (рис. 1, 2). В результаті будуть обґрунтовані склади сумішей та надані рекомендації щодо вибору вуглецевих наповнювачів та в'язучих для електропровідних розчинів і бетонів в залежності від умов застосування матеріалів.

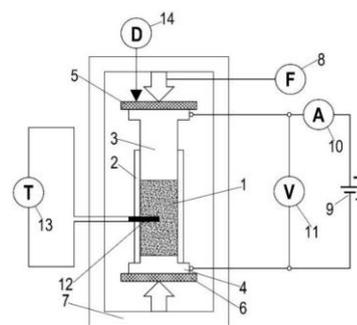


Рис. 1. Схема для тестування питомого опору електропровідних наповнювачів:

- 1 – струмопровідний наповнювач;
- 2 – матриця (діелектрична труба);
- 3, 4 – верхній і нижній струмопровідні пуансони;
- 5, 6 – верхня і нижня діелектричні прокладки;
- 7 – прес; 8 – вимірювач зусилля преса;
- 9 – акумулятор; 10 – амперметр; 11 – вольтметр;
- 12 – термопара; 13 – індикатор температури;
- 14 – індикатор переміщення

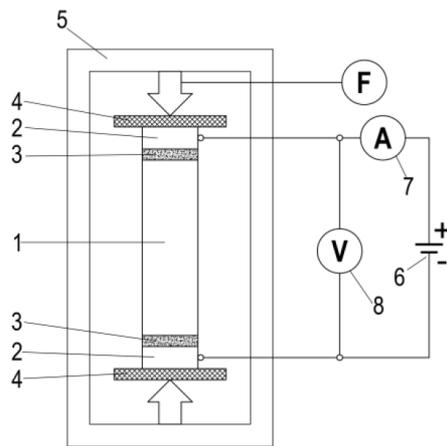


Рис. 2. Схема для тестування питомого опору бетону: 1 – зразок бетону; 2 – електропровідна пластина; 3 – електропровідна прокладка; 4 – діелектрична прокладка; 5 – гідравлічний чи механічний прес або струбцина; 6 – акумулятор; 7 – амперметр; 8 – мультиметр

Фінальним етапом роботи буде дослідження захисних властивостей електропровідних бетонів і покриттів при дії електромагнітних випромінювань. Для експериментальних досліджень захисних властивостей бетону та покриттів при дії електромагнітних випромінювань буде адаптована стандартна закордонна методика ASTM D4935-18 [18] з врахуванням наявного вітчизняного обладнання для генерації і вимірювання електромагнітних хвиль (рис. 3).

Проведені експериментальні дослідження дозволять сформулювати рекомендації щодо проектування оптимальних складів електропровідних бетонів і покриттів для екранування електромагнітних полів, які будуть ґрунтуватися на показниках ефективності захисту від дії електромагнітних хвиль різної частоти, а також економічної ефективності використання матеріалів з врахуванням дисконтування.

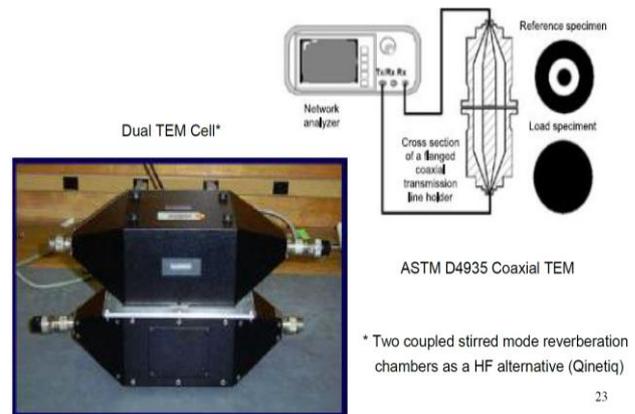


Рис. 3. Схема стандартного методу вимірювання ефективності електромагнітного екранування плоских матеріалів згідно [18]

Висновки

Завдання науково-дослідної роботи спрямовані на розробку наукових та експериментальних основ створення електропровідних бетонів і розсіюючих та радіопоглинаючих покриттів для екранування електромагнітних полів на основі вуглецево-цементних композитів, що забезпечать інформаційну безпеку та стійкість об'єктів і систем оборони, критичної інфраструктури, бойових машин, підвищать ступінь їх захисту та виживаності.

Результати досліджень матимуть високу наукову цінність, оскільки будуть полягати у розвитку напряму створення високофункціональних композитів різного призначення. Беззаперечним також є практичне значення запланованих результатів для безпеки та обороноздатності країни. Отримані теоретичні та експериментальні дані можуть бути використані при захисті і зменшенні вірогідності виявлення і враження оборонних об'єктів, об'єктів критичної інфраструктури, командних пунктів, бойових машин, забезпечення інформаційної безпеки об'єктів і систем управління і прийняття рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. The Hidden Dangers of Electricity Are a Mortal Threat to Humanity [Електронний ресурс]. American Intelligence Media. URL: <https://aim4truth.org/2020/09/25/the-hidden-dangers-of-electricity-are-a-mortal-threat-to-humanity> (дата звернення: 26.11.2025).
2. The Sensible Guide To Electromagnetic Pulse Attacks [Електронний ресурс]. Primal Survivor. URL: <https://www.primalsurvivor.net/emp-protection-preparation/> (дата звернення: 26.11.2025).

3. Directed Energy Weapons: High Power Microwaves. Office of Naval Research [Електронний ресурс]. Office of Naval Research. URL: <https://www.onr.navy.mil/organization/departments/code-35/division-353/directed-energy-weapons-high-power-microwaves> (дата звернення: 26.11.2025).
4. Electromagnetic Pulse (EMP) Protection and Resilience Guidelines for Critical Infrastructure and Equipment [Електронний ресурс]. Arlington, Virginia : National Cybersecurity and Communications Integration Center, 2019. 70 p. URL: https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/19_0307_CISA_EMP-Protection-Resilience-Guidelines.pdf (дата звернення: 26.11.2025).
5. LearnEMC – Introduction to Practical Electromagnetic Shielding [Електронний ресурс]. LearnEMC – LearnEMC Home Page. URL: <https://learnemc.com/practical-em-shielding> (дата звернення: 26.11.2025).
6. What Is A Faraday Cage? EMF Protection Pros [Електронний ресурс]. EMF Protection Pros. URL: <https://www.emfprotectionpros.com/faraday-cage/> (дата звернення: 26.11.2025).
7. Electromagnetic Pulse Shielding Mitigations Best Practice. Homeland Security [Electronic resource]. U.S. Department of Homeland Security. URL: <https://www.dhs.gov/science-and-technology/publication/electromagnetic-pulse-shielding-mitigations-best-practice> (date of access: 26.11.2025).
8. Большаков В. І., Савицький М. В. Електропровідні нанокласти для систем діагностики технічного стану герметизуючих оболонок АЕС. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. № 5 (218). С. 16–34.
9. Плугин А. А. Электропроводящие покрытия для защиты от электрокоррозии: обоснование конструкции защиты и требований к покрытию. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. 2013. № 47 (1020). С. 101–107.
10. Осиний Г., Субач В., Биков В., Колчигін М. Зниження радіолокаційної помітності літальних апаратів за допомогою Stealth-технологій. *Озброєння та військова техніка*. 2018. № 18 (2). С. 71–74.
11. Savytskyi M., Sukhyu K., Savytskyi O., Babenko M., Shevchenko T. Carbon materials for electrically conductive concrete. *E3S Web of Conferences. ICSBT-2024*. Vol. 534. P. 01019. 2024. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453401019>
12. Savytskyi M., Pang W., Sun L., Savytskyi O., Bordun M., Li Y., Xia Y., Wang H. Development of Test Methods in the Process of Electrically Conductive Concrete Production. *9th International Conference on Mechanical Structures and Smart Materials. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*. Vol. 2845. 2024. P. 012032. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2845/1/012032>
13. Savytskyi M., Sukhyu K., Savytskyi O., Shevchenko T., Bordun M. Smart Concretes as the Basis for Creating Smart Buildings. *Proceedings of EcoComfort 2024. EcoComfort-2024. Lecture Notes in Civil Engineering*. Vol. 604. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-67576-8_42
14. Krause A., Nguyen L., Tuan C., Bonsell J., Chen B. Conductive Concrete as an Electromagnetic Shield. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2012. Pp. 85–87. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/286729977.pdf> (дата звернення: 26.11.2025).
15. Peng M., Qina F. Clarification of Basic Concepts for Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness. URL: <https://arxiv.org/pdf/2112.03272> (дата звернення: 26.11.2025).
16. Choi I., Kim J., Seo S., Lee D. Radar absorbing sandwich construction composed of CNT, PMI foam and carbon/epoxy composite. *Composite Structures*. 2012. Vol. 94 (9). Pp. 3002–3008. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.04.009>
17. Kim S., Lee S., Zhang Y., Park S., Gu J. Carbon-Based Radar Absorbing Materials toward Stealth Technologies. *Adv. Sci*. 2023. Vol. 10. P. 104. URL: <https://doi.org/10.1002/advs.202303104>
18. ASTM D 4935-18. Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials. ASTM International : West Conshohocken, PA, USA, 2018.

REFERENCES

1. The Hidden Dangers of Electricity Are a Mortal Threat to Humanity [Electronic resource]. American Intelligence Media. URL: <https://aim4truth.org/2020/09/25/the-hidden-dangers-of-electricity-are-a-mortal-threat-to-humanity> (date of access: 26.11.2025).
2. The Sensible Guide To Electromagnetic Pulse Attacks [Electronic resource]. Primal Survivor. URL: <https://www.primalsurvivor.net/emp-protection-preparation/> (date of access: 26.11.2025).
3. Directed Energy Weapons : High Power Microwaves. Office of Naval Research [Electronic resource]. Office of Naval Research. URL: <https://www.onr.navy.mil/organization/departments/code-35/division-353/directed-energy-weapons-high-power-microwaves> (date of access: 26.11.2025).
4. Electromagnetic Pulse (EMP) Protection and Resilience Guidelines for Critical Infrastructure and Equipment [Electronic resource]. Arlington, Virginia : National Cybersecurity and Communications Integration Center, 2019, 70 p. URL: https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/19_0307_CISA_EMP-Protection-Resilience-Guidelines.pdf (date of access: 26.11.2025).
5. LearnEMC – Introduction to Practical Electromagnetic Shielding [Electronic resource]. LearnEMC – LearnEMC Home Page. URL: <https://learnemc.com/practical-em-shielding> (date of access: 26.11.2025).

6. What Is A Faraday Cage? EMF Protection Pros [Electronic resource]. EMF Protection Pros. URL: <https://www.emfprotectionpros.com/faraday-cage/> (date of access: 26.11.2025).
7. Electromagnetic Pulse Shielding Mitigations Best Practice. Homeland Security [Electronic resource]. U.S. Department of Homeland Security. URL: <https://www.dhs.gov/science-and-technology/publication/electromagnetic-pulse-shielding-mitigations-best-practice> (date of access: 26.11.2025).
8. Bolshakov V.I. and Savytskyi M.V. *Elektroprovodni nanokompozyty dlia system diahnostryky tekhnichnoho stanu hermetyzuiuchykh obolonok AES* [Electrically conductive nanocomposites for diagnostic systems for the technical condition of nuclear power plant containment shells]. *Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2016, no. 5 (218), pp. 16–34. (in Ukrainian).
9. Plugin A.I.A. *Elektroprovodyashchie pokrytiya dlya zashchity ot elektrokorrozii: razrabotka sostavov* [The electrically conductive coating for protection against galvanic corrosion: development of formulations]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universitetu "KhPI". Seriiia : Khimiia, khimichna tekhnolohiia ta ekologiia* [Bulletin of the State Technical University "KhPI". Series : Chemistry, Chemical Technology and Ecology]. 2013, iss. 64 (1037), pp. 120–128. (in Russian).
10. Osynovyi H., Subach V., Bykov V. and Kolchyhin M. *Znyzhennia radiolokatsiinoi pomitnosti litalnykh aparativ za dopomohoiu Stealth-tekhnolohii* [Reducing the radar visibility of aircraft using Stealth technologies]. *Ozbroiennia ta viiskova tekhnika* [Arms and Military Equipment]. 2018, no. 18 (2), pp. 71–74. (in Ukrainian).
11. Savytskyi M., Sukhyy K., Savytskyi O., Babenko M. and Shevchenko T. Carbon materials for electrically conductive concrete. *E3S Web of Conferences. ICSBT 2024*. Vol. 534, p. 01019, 2024. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453401019>
12. Savytskyi M., Pang W., Sun L., Savytskyi O., Bordun M., Li Y., Xia Y. and Wang H. Development of Test Methods in the Process of Electrically Conductive Concrete Production. 9th International Conference on Mechanical Structures and Smart Materials. *Journal of Physics : Conference Series. IOP Publishing*. Vol. 2845, 2024, p. 012032. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2845/1/012032>
13. Savytskyi M., Sukhyy K., Savytskyi O., Shevchenko T. and Bordun M. Smart Concretes as the Basis for Creating Smart Buildings. *Proceedings of EcoComfort 2024. EcoComfort 2024. Lecture Notes in Civil Engineering*. Vol 604. Springer, Cham. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-67576-8_42
14. Krause A., Nguyen L., Tuan C., Bonsell J and Chen B. Conductive Concrete as an Electromagnetic Shield. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2012, pp. 85–87. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/286729977.pdf> (date of access: 26.11.2025).
15. Peng M. and Qina F. Clarification of Basic Concepts for Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness. URL: <https://arxiv.org/pdf/2112.03272> (date of access: 26.11.2025).
16. Choi I., Kim J., Seo S. and Lee D. Radar absorbing sandwich construction composed of CNT, PMI foam and carbon/epoxy composite. *Composite Structures*. 2012, vol. 94 (9), pp. 3002–3008. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.04.009>
17. Kim S., Lee S., Zhang Y., Park S. and Gu J. Carbon-Based Radar Absorbing Materials toward Stealth Technologies. *Adv. Sci.* 2023, vol. 10, 2303, p. 104. URL: <https://doi.org/10.1002/advs.202303104>
18. ASTM D 4935-18. Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials. ASTM International : West Conshohocken, PA, USA, 2018.

Надійшла до редакції: 26.09.2025.

УДК 624.012

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.241225.149.1218

ПОШКОДЖУВАНІСТЬ МЕТАЛЕВИХ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ І ДИМОВИХ ТРУБ ТА ЇХ СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ

ЯРОВИЙ С. М.^{1*}, докт. техн. наук, проф.,
ЯРОВИЙ Ю. М.², канд. техн. наук, доц.,
ТИТЮК А. О.³, канд. техн. наук, доц.,
ДАНИЛЬЧЕНКО О. О.⁴, аспір.

^{1*} Кафедра проектування конструкцій, Харківський національний університет міського господарства ім. О. В. Бекетова, вул. Бажанова, 17, 61102, Харків, Україна, тел. +38 (057) 707-31-09, e-mail: psp.nauka@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2886-9456

² Кафедра теоретичної і будівельної механіки Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, вул. Бажанова, 17, 61102, Харків, Україна, тел. +380 (63) 611-76-30, e-mail: yriy.yarovyy@kname.edu.ua, ORCID ID: 0009-0005-1951-9798

³ Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 480-18-60, e-mail: anatol-61@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4927-370X

⁴ Кафедра проектування конструкцій, Харківський національний університет міського господарства ім. О. В. Бекетова, вул. Бажанова, 17, 61102, Харків, Україна, тел. +38 (067) 745-31-37, e-mail: sasha2001danilchenko@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-9434-8920

Анотація. Постановка проблеми. Металеві димові та вентиляційні труби становлять критичний структурний компонент технологічних систем промислових підприємств, від надійності яких безпосередньо залежить неперервність виробничих процесів. У процесі тривалої експлуатації ці інженерні конструкції перебувають під постійним впливом складного комплексу деструктивних факторів, включаючи інтенсивні силові навантаження, динамічні коливання, агресивне корозійне середовище та суттєві температурні деформації. Комплексний вплив зазначених чинників несприятливо позначається на експлуатаційній надійності та довговічності труб, що з плином часу призводить до виникнення, накопичення та прогресування різноманітних дефектів та пошкоджень. За результатами численних обстежень технічного стану металевих димових та вентиляційних труб було здійснено систематизацію та класифікацію виявлених дефектів відповідно до їхнього типу, розміру та ступеня небезпеки. Статистична обробка даних дала змогу виявити закономірності пошкоджуваності, визначити найпоширеніші категорії дефектів та оцінити ступінь їхньої потенційної загрози для безпеки виробничих процесів. Крім того, у дослідженні розроблено класифікацію пошкоджень за рівнями небезпеки, що служить основою для ухвалення своєчасних рішень стосовно ремонту або реконструкції труб. Розроблені практичні заходи для усунення наявних дефектів, а також профілактичні методи, спрямовані на запобігання їх подальшій появі дефектів. Реалізація таких підходів буде сприяти підвищенню надійності та стабільності роботи промислових підприємств, зменшенню ризику аварій і продовженню експлуатаційного терміну металевих димових та вентиляційних труб.

Ключові слова: металеві димові та вентиляційні труби; пошкоджуваність конструкцій; категорії небезпечності; статистичний аналіз пошкоджень; надійність і довговічність

DAMAGEABILITY OF METAL VENTILATION AND SMOKE PIPES AND THEIR STATISTICAL ANALYSIS

YAROVYI S.M.^{1*}, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
YAROVYI Yu.M.², Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
TYTIUK A.O.³, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
DANYLCHENKO O.O.⁴, Postgrad. Stud.

^{1*} Department of Structural Design, Kharkiv National University of the City Economy named after O.M. Beketova, 17, Str. Bazhanova, Kharkiv, 61102, Ukraine, tel. +38 (057) 707-31-09, e-mail: psp.nauka@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2886-9456

² Department of Theoretical and Structural Mechanics, Kharkiv National University of the City Economy named after O.M. Beketova, 17, Str. Bazhanova, Kharkiv, 61102, Ukraine, tel. +380 (63) 611-76-30, e-mail: yriy.yarovyy@kname.edu.ua, ORCID ID: 0009-0005-1951-9798

³ Department of Reinforced-Concrete and Masonry Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 480-18-60, e-mail: anatol-61@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4927-370X

⁴ Department of Structural Design, Kharkiv National University of the City Economy named after O.M. Beketova, 17, Str. Bazhanova, Kharkiv, 61102, Ukraine, tel. +38 (067) 745-31-37, e-mail: sasha2001danilchenko@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-9434-8920

Abstract. Problem statement. Metal smoke and ventilation pipes are essential components in the operation of many technological processes at industrial enterprises, and their failure often leads to a complete shutdown of production. Throughout their long service life, these structures are continuously exposed to various factors: mechanical and dynamic loads, aggressive corrosive environments, as well as significant temperature fluctuations. The combined influence of these conditions adversely affects the operational reliability and durability of the pipes, eventually causing the formation, accumulation, and progression of different types of defects and damages. Based on the results of numerous inspections of the technical condition of metal smoke and ventilation pipes, the identified defects were systematized and classified according to their type, size, and hazard level. Statistical analysis of the collected data made it possible to establish patterns of damage occurrence, highlight the most common defect categories, and assess the potential risk they pose to the safety of industrial processes. Furthermore, a classification of damages according to hazard levels has been developed, forming the basis for timely decision-making regarding repair or reconstruction of the pipes. Practical measures have been proposed for eliminating existing defects, as well as preventive methods aimed at avoiding their further development. Implementation of these approaches will improve reliability and continuity of industrial operations, reduce accident risks, and extend the service life of metal smoke and ventilation pipes.

Keywords: metal smoke and ventilation pipes; structural damage; hazard categories; statistical analysis of damage; reliability and durability

Постановка проблеми. Металеві димові та вентиляційні труби є важливими елементами промислових підприємств, функцією яких є відведення димових та вентиляційних газів, що утворюються в процесі виробництва (рис. 1).



Рис. 1. Металеві димові труби КС «Південнобузька» магістрального газопроводу. Корозійний знос стовбурів труб до 5 %

У процесі тривалої експлуатації ці конструкції зазнають комплексу несприятливих факторів, таких як динамічні та силові навантаження, перепади температур й вплив агресивних корозійних середовищ [1–5; 10; 11].

Додатковим ускладненням для їх технічного стану є функціонування в умовах

складного напруженого стану, що з часом призводить до неминучих погіршень експлуатаційних характеристик. Сукупна дія зазначених факторів поступово призводить до виникнення та накопичення різноманітних дефектів та скорочує довговічність конструкцій [6; 7].

Найнебезпечніші пошкодження металевих конструкцій проявляються у вигляді тріщин у металі стовбура труби, деформацій, корозійного зносу опорних елементів та руйнуванні зварних швів. Розвиток подібних дефектів підвищує ризик виходу з ладу не лише окремих конструктивних частин, а й усієї споруди загалом, що може призвести до серйозних наслідків для безпеки виробництва та довкілля.

Попри важливість цієї проблеми, науково-технічна література містить лише фрагментарну інформацію щодо пошкоджуваності димових металевих труб та несучих веж. Відсутні систематизованих статистичних даних щодо закономірності, характеру та масштабів виникнення дефектів і пошкоджень у таких висотних конструкціях. Істотно ускладнює розроблення науково обґрунтованих рішень щодо подовження терміну експлуатації, удосконалення

ремонтних технологій та підвищення їхньої надійності та довговічності.

У цьому контексті особливо важливим стає завдання ідентифікації та систематизації основних видів пошкоджень і дефектів металевих димових та вентиляційних труб. Їх подальша класифікація та статистичний аналіз дозволяють не визначити технічний стан конструкторів, а й спрогнозувати потинційний розвиток руйнувань [8; 12]. На основі обстеження більш ніж 150 металевих труб виконано класифікацію за видами та ступенем інтенсивності прояву дефектів, що формує базу для подальшого вдосконалення діагностичних методик і підвищення надійності таких інженерних споруд.

Мета дослідження – полягає в аналізі результатів технічного обстеження металевих вентиляційних димових труб, що відносяться до різних конструкторських типів та відрізняються умовами експлуатації. Завдання включає виявлення найпоширеніших дефектів і пошкоджень, їх систематизацію, класифікацію та оцінку рівня небезпечності.

Результати. У ході технічного обстеження значної кількості металевих димових і вентиляційних труб встановлено основні типи дефектів та пошкоджень:

- лакофарбове покриття зруйновано більше ніж на 30 % від площі поверхні та подальший корозійний знос металу (пошкодження 1) (рис.1);

- зменшення товщини стінки до 10 % через корозійний знос (пошкодження 2, рис. 2);

- локальні, виразкові та наскрізні корозійні пошкодження стінки (пошкодження 3);

- тріщини в наволошовній зоні та основному металі зварних швів (пошкодження 4, рис. 3);

- у зварних швах присутні подрізи, непровари, шлакові вclusions та пори (пошкодження 5);

- болтові з'єднання, включаючи анкерні ослаблені або пошкоджені (пошкодження 6);

- виникнення пошкоджень в ребрах жорсткості, траверсах і плитах опорних вузлів (пошкодження 7);

- пошкоджені металеві опори під труби (пошкодження 8);

- локальна втрата стійкості стовбура труби (пошкодження 9);

- в бетоні фундаментів присутні тріщини, що призводять до корозії робочої арматури (пошкодження 10).



Рис. 2. Корозійний знос з середини труби факельної установки понад 10 % перерізу



Рис. 3. Тріщини в основному металі, зварних швах і наволошовній зоні

На основі проведених обстежень виконано статистичний аналіз та побудована діаграма, що відображає загальну вибірку виявлених дефектів і пошкоджень (рис. 4).

Виникнення та розвиток дефектів і пошкоджень обумовлений сукупним впливом температурних, вітрових, експлуатаційних та корозійних чинників.

Однак кожен вид пошкоджень має свій основний фактор впливу.

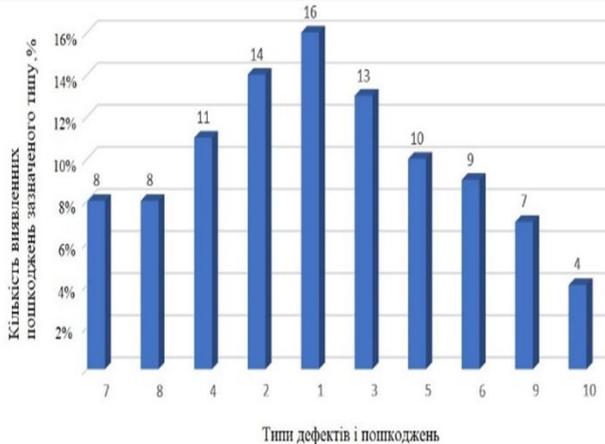


Рис. 4. Пошкоджуваність металевих стовбурів димових труб

Локальні, виразкові та наскрізні корозійні ураження стінки, що призводять до повної втрати товщини, тріщини в основному металі, зварних швах і навколошовній зоні а також локальна втрата стійкості стовбура труби спричинені переважно корозійними, температурними та динамічними впливами.

Такі дефекти як подрізи, непровари, шлакові включення та пори в зварних з'єднаннях є наслідком недостатньої якості монтажних робіт.

Пошкодженні анкерні болти, ребера, плити і траверси в опорних вузлах, пошкодження металевих опор під трубу, прояви корозії є результатом незадовільного рівня експлуатації системи.

Наскрізні корозійні пошкодження стінок стовбура труби (пошкодження 3), тріщини в основному металі та зварних швах (пошкодження 4), утрата стійкості стовбура (пошкодження 9) належать до дефектів, що створюють прямий ризик руйнування конструкції. Ці пошкодження потребують негайного усунення одразу після виявлення. Вони класифікуються як категорія небезпечності «А», а їх частка становить 31 % від загальної кількості виявлених дефектів.

До категорії небезпечності «Б» належать дефекти і пошкодження (дефекти 2, 5, 6, 7, 8, 10), які в разі подальшого розвитку можуть перетворитися на критичні

й призвести до серйозних наслідків. Усунення цих пошкоджень рекомендується виконати під час планового ремонту. Від загальної вибірки такі дефекти складають 54 %.

Руйнування захисного лакофарбового покриття (дефект 1) носить локальний характер і не загрожує несучій здатності труби. Виявлені пошкодження підпадають під категорію небезпечності «В» і мають бути усунені в рамках планового ремонту. За результатами обстежень, даний тип пошкоджень складає 16 % від загального числа дефектів і пошкоджень.



Рис. 5. Випинання (утрата стійкості) кладки футеровки димової труби

Оцінювання технічного стану внутрішньої футеровки димових та вентиляційних труб здійснювалося шляхом проведення обстежень із різних точок доступу. Для цього використовувались вхідні люки в днищі труби, верхня частина (оголовок), та спеціальні люльки-ліфти, закріплені на оголовку та розташовані всередині стовбура. У процесі досліджень були виявленні характерні дефекти та пошкодження футеровки металевих димових труб:

- відсутня або пошкоджена теплоізоляція (пошкодження 1);
- проміжки між ланками футеровки труби (пошкодження 2);
- похилі та вертикальні тріщини у футеровці труби (пошкодження 3);
- локальні руйнування футеровочного шару (пошкодження 4);

- руйнування слізникових консолей (пошкодження 5);

- випинання або обвалення кладки футеровки (пошкодження 6) (рис. 5).

На рисунку 6 представлена діаграма, яка демонструє статистичні дані про пошкодження футеровки металевих димових і вентиляційних труб.

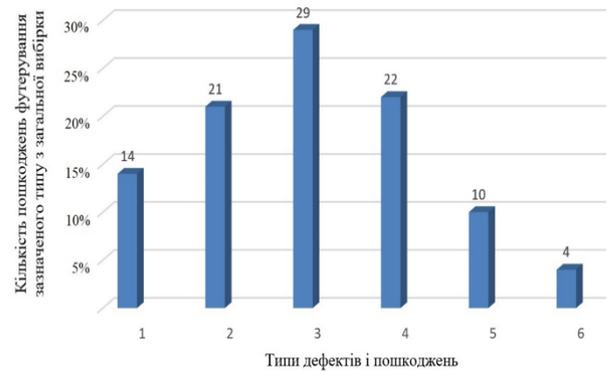


Рис. 6. Пошкоджуваність футеровки металевих димових труб

Таблиця 1

Характеристика основних дефектів і пошкоджень димових і вентиляційних труб

№ п/п	Вид і місце розташування дефекту і пошкодження	Ймовірна причина виникнення дефекту і пошкодження	Метод виявлення або ознака виникнення дефекту чи пошкодження	Заходи щодо попередження подальшого розвитку дефекту і його усунення	Категорія небезпечності
1	Нахил фундаменту димової труби більше допустимого значення	Порушення несучої здатності фундаменту	Вимірювання нахилу геодезичним методом	Укріплення основи. Випрямлення нахилу металеві труби	«А»
2	Тріщини в основному металі і швах	Мікротріщини у зварних швах, динамічні впливи вітрового навантаження	Візуальне й інструментальне обстеження	Ремонт основного металу або швів методом заварювання або підсилення накладками	«Б», «А»
3	Підвищена корозія ділянок стовбура, майданчиків і драбин (знос до 100%)	Концентратори утворення корозії. Локальна і виразкова корозія	Контроль корозійного зносу ультразвуковими приладами	Періодичність контролю корозійного зносу з урахуванням швидкості корозії в локальних зонах, ремонт стовбура заміною ділянок або підсилення	«А», «Б»
4	Наскрізні отвори у стовбурі труби	Корозійне руйнування металу через відсутність антикорозійного захисту	Візуальне й інструментальне обстеження	Ремонт стовбура, визначення несучої здатності стовбура з урахуванням ступеня зносу суміжних ділянок	«А», «Б»
5	Ослаблення затягнення болтів фланцевих стиків, анкерних болтів	Зниження затягнення болтів унаслідок релаксації матеріалу, динамічних впливів	Візуальне й інструментальне обстеження по слідах виходу конденсату димових газів	Перевірка ступеня затягнення болтів, контроль за збереженням ущільнення з'єднань царг і фрагментів труби	«Б»
6	Місцева втрата стійкості, випинання стінки стовбура, утворення гофр	Корозійний знос стінки стовбура в зоні деформації, підвищення температури експлуатації	Візуально, товщинометрія стовбура труби ультразвуковим приладом	Підсилення металевого стовбура обичайками або заміна ділянок труби	«А»
7	Обвалення футеровки	Вибух газу в газовідвідному тракті	Візуально, фотозйомка	Заміна футеровки	«А»

Температурні навантаження та силові впливи, включно з вибухами газу всередині труби, є основними факторами, що впливають на стан футеровки та спричиняють появу тріщин (дефект 3), локальних пошкоджень (дефект 4), випинання кладки (дефект 6), а також пошкодження теплоізоляції. До найбільш небезпечної категорії віднесено локальні наскрізні пошкодження футеровки та випинання чи обвалення кладки (дефекти 4 та 6). Ці пошкодження становлять суттєву загрозу руйнування всієї конструкції труби. За результатами обстежень, вони складають 43 % усіх виявлених дефектів та класифікуються як категорія небезпечності «А». У разі їх виявлення експлуатація труби повністю забороняється, виробничий процес необхідно негайно зупинити, а для відновлення працездатності споруди виконати капітальний ремонт. Вертикальні та похилі тріщини силового чи температурного походження у футеровці (дефект 3) зафіксовані у 29 % випадків. Якщо ширина розкриття таких тріщин не перевищує 0,3 мм, вони не представляють значної загрози несучим властивостям конструкції та належать до категорії «В». Їх усунення здійснюється шляхом замазування жаростійким цементним розчином з додаванням меленого шамоту. Проте з розвитком таких тріщин можливе випадіння окремих фрагментів кладки, пошкодження теплоізоляції та утворення прогарів у стовбурі труби, що може призвести до переходу дефектів у категорії «Б» або «А». Моніторинг розвитку таких пошкоджень здійснюється в рамках планових технічних оглядів, що проводяться періодично для своєчасного виявлення дефектів.

У таблиці 1 представлена інформація про основні дефекти та пошкодження, їхні характеристики, ймовірні причини виникнення, а також заходи, спрямовані на запобігання подальшому розвитку та усунення цих проблем. Також наведено категорію небезпечності дефектів для оцінки їх потенційної загрози.

До окремої групи належать, що виникають у процесі будівельно-монтажних робіт, такі як відсутність теплоізоляції (дефект 1) та утворення проміжків між ланками футеровки (дефект 2). Через такі порушення відбувається конденсація вологи на внутрішній поверхні труб, що прискорює корозійне руйнування. Подібні дефекти усувають під час планового ремонту. Виправлення дефектів категорії «В», а також деяких пошкоджень початкової стадії категорії «Б» яку розробляють проектні або експлуатаційні організації. У свою чергу, усунення дефектів категорії «А» і пошкоджень категорії «Б», які можуть швидко перейти до категорії «А», потребує виконання капітального ремонту. Для цього спеціалізовані організації розробляють технічну документацію на основі комплексного обстеження всіх конструктивних елементів труби.

Висновки

На основі результатів численних обстежень металевих димових і вентиляційних труб визначено основні типи дефектів та пошкоджень як стовбурів, так і їх внутрішньої футеровки. Для виявлених пошкоджень здійснено класифікацію за характером прояву та величиною, а також проведено статистичний аналіз їх поширеності та ступеня небезпеки. Усі основні дефекти і пошкодження були систематизовані за кількома критеріями: залежно від категорії небезпечності, з урахуванням імовірних причин виникнення, а також з позиції їхнього впливу на подальший технічний стан конструкцій. Такий підхід дав змогу не лише оцінити загальний рівень пошкоджуваності труб, але й виявити закономірності у розвитку дефектів різного походження. Отримані результати формують науково обґрунтовану базу для підвищення надійності та довговічності металевих димових і вентиляційних труб, а також створюють передумови для подальшого вдосконалення методів оцінки їх технічного стану.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування із зміною № 1. Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. 105 с.
2. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд із зміною № 1. Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. 36 с.
3. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування із зміною № 1 та № 2. Київ : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2020. 72 с.
4. ДСТУ 9273:2024. Настанова щодо обстеження будівель та споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. Київ, 2024.
5. Яровий С. М., Ярова О. В. Довговічність металевих димових і вентиляційних труб при загальній втраті стійкості труби і прогарам в стінці. *Науковий вісник будівництва : зб. наук. пр.* Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2020. Вип. 3 (101). С. 112–117.
6. Яровий С. М., Савицький М. В., Слободянюк С. О. Забезпечення надійності металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж. *Опір матеріалів та теорія споруд : зб. наук. пр.* Вип. 106. Київ : КНУБА, 2021. С. 120–146.
7. Яровий С. М., Ярова О. В. Довговічність металевих димових і вентиляційних труб за критеріями механіки руйнування. *Науковий вісник будівництва : зб. наук. пр.* Харків : ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2021. Вип. 3 (105). С. 115–122.
8. Яровий С. М., Данильченко О. О., Чередник Д. Л. Фізико статистичний метод оцінки довговічності металевих вентиляційних та димових труб. *Будівництво та цивільна інженерія : зб. наук. пр.* Харків, 2025. Вип. 4 (112). С. 394–301.
9. Zdzislaw Pisarek. Failure of a Steel Boiler Chimney Caused by Corrosion of the Structural Shell Plate. 2019.
10. Ellingsen Ø. M. and oth. Field Tests on a Full-Scale Steel Chimney Subjected to Vortex-Induced Vibrations. 2023.
11. Malik Anees U., Al-Muaili Fahd, Al-Ayashi Mohammad, Meroufel A. An investigation on the corrosion of flue gas sensor in boiler stack. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. № 1. 2013. Pp. 200–208.
12. Ellingsen Øyvind M., Larsen T., Skallerud B., Hjorth-Hansen E. Field Tests on a Full-Scale Steel Chimney Subjected to Vortex-Induced Vibrations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023. 233 p.

REFERENCES

1. *DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsiyi. Normy proektuvannya zi zminoyu № 1* [DBN V.2.6-198:2014. Steel structures. Design standards with amendment no. 1]. Kyiv : Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine, 2022, 105 p. (in Ukrainian).
2. *DBN V.1.2-14:2018. Zahal'ni pryntsyipy zabezpechennya nadiynosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel' i sporud iz zminoyu № 1* [DBN V.1.2-14:2018. General principles for ensuring the reliability and structural safety of buildings and structures with amendment no. 1]. Kyiv : Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine, 2022, 36 p. (in Ukrainian).
3. *DBN V.1.2-2:2006. Navantazhennya i vplyvy. Normy proektuvannya iz zminoyu № 1 ta № 2* [DBN V.1.2-2:2006. Loads and impacts. Design standards with amendments no. 1 and no. 2]. Kyiv : Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine, 2020, 72 p. (in Ukrainian).
4. *DSTU 9273:2024. Nastanova shchodo obstezhennya budivel' ta sporud dlya vyznachennya ta otsinky yikh tekhnichnoho stanu* [DSTU 9273:2024. Guidelines for the inspection of buildings and structures to determine and assess their technical condition]. Kyiv, 2024. (in Ukrainian).
5. Yaroviy S.M. and Yarova O.V. *Dovhovichnist' metalevykh dymovykh i ventylyatsiynykh trub pry zahal'niy vtrati stiykosti truby i proharamy v stintsi* [Durability of Metal Smoke and Ventilation Pipes under General Loss of Stability of the Pipe and Burnouts in the Wall]. *Naukovyy visnyk budivnytstva : zb. naukovykh prats'* [Scientific Bulletin of Construction : coll. of scient. works]. Kharkiv : KhNUBA, KHOTV ABU, 2020, iss. 3 (101), pp. 112–117. (in Ukrainian).
6. Yaroviy S.M., Savytskyi M.V. and Slobodyanyuk S.O. *Zabezpechennya nadiynosti metalevykh dymovykh i ventylyatsiynykh trub ta yikh nesuchykh vezh* [Ensuring the Reliability of Metal Smoke and Ventilation Pipes and Their Supporting Towers]. *Opir materialiv ta teoriya sporud : zb. nauk. pr.* [Strength of Materials and Theory of Structures : coll. of scient. works]. Kyiv : KNUBA, 2021, iss. 106, pp. 120–146. (in Ukrainian).
7. Yaroviy S.M. and Yarova O.V. *Dovhovichnist' metalevykh dymovykh i ventylyatsiynykh trub za kryteriyamy mekhaniky ruynuvannya* [Durability of Metal Smoke and Ventilation Pipes According to the Criteria of Fracture Mechanics]. *Naukovyy visnyk budivnytstva : zb. naukovykh prats'* [Scientific Bulletin of Construction : coll. of scient. works]. Kharkiv : KhNUBA, KHOTV ABU, 2021, iss. 3 (105), pp. 115–122. (in Ukrainian).
8. Yaroviy S.M., Danylchenko O.O. and Cherednyk D.L. *Fyzyko statystychnyy metod otsinky dovhovichnosti metalevykh ventylyatsiynykh ta dymovykh trub* [Physico-Statistical Method for Assessing the Durability of Metal

Ventilation and Smoke Pipes]. *Budivnytstvo ta tsyvil'na inzheneriya : zb. naukovykh prats'* [Construction and Civil Engineering : coll. of scient. Works]. Kharkiv, 2025, iss. 4 (112), pp. 394–301. (in Ukrainian).

9. Zdzislaw Pisarek Failure of a Steel Boiler Chimney Caused by Corrosion of the Structural Shell Plate. 2019.

10. Ellingsen Ø. M. and oth. Field Tests on a Full-Scale Steel Chimney Subjected to Vortex-Induced Vibrations. 2023.

11. Malik Anees U., Al-Muaili Fahd, Al-Ayashi Mohammad and Meroufel A. An investigation on the corrosion of flue gas sensor in boiler stack. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*. No. 1, 2013, pp. 200–208.

12. Ellingsen Øyvind M., Larsen T., Skallerud B. and Hjørth-Hansen E. Field Tests on a Full-Scale Steel Chimney Subjected to Vortex-Induced Vibrations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2023, 233 p.

Надійшла до редакції: 22.10.2025.

Відповідальність за достовірність інформації, що міститься в друкованих матеріалах,
несуть автори.

Редколегія не завжди поділяє авторську точку зору.

Комп'ютерну верстку виконано в редакційно-видавничому відділі
Українського державного університету науки і технологій, ННІ «ПДАБА»

А д р е с а р е д а к ц і ї:

✉ вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Україна, м. Дніпро
кімната 501 (відповідальний секретар)

☎ +38 (050) 452-43-63

e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com

Підписано до друку 30.12.2025 р. Формат 60×84 1/8.

Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 9,81. Умовн. фарб.-відб. арк. 9,81.

Обл.-видавн. арк. 19,63. Наклад 50 прим. Зам. 217

Authors are responsible for the accuracy of the information
contained in the printed materials.

Editors do not always agree with the author's point of view.

Desktop publishing is performed in the Editorial Department of
Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "PSACEA".

Editorial address:

✉ room 501 (Executive Secretary)

24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine

☎ +38 (050) 452-43-63

e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com

Sent to press on 30 December 2025. Format 60×84 1/8.

Digital printing. Conventional quire 9,81. Conventional colour imprints 9,81.

Publisher's signatures 19,63. Number of copies 50. Order 217