

**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

№ 5 (029)
вересень — жовтень 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. Сєдін, 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).
Свідцтво 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 № 2 від 05.11.2025.
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

№ 5 (029)
September – October 2025

Dnipro 2025

EDITORIAL STAFF:

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

MEMBERS OF EDITORIAL STAFF:

A.S. Belikov, Doctor of Engineering Science, *ESI "Prydniprovsk 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 Korjaks, 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 IIP – issued by the Ministry of Justice of Ukraine dated October 09, 2020.
Founder & Publisher	State Higher Education Institution "Prydniprovsk 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. 2 from 05.11.2025
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) <i>Art & Technical Editor</i> Serhii MOISEIENKO <i>Editor & Proofreader</i> Olena TYMOSHENKO

У ЦЬОМУ НОМЕРІ

Безрук Т. І., Кузьменко А. О., Гайдар А. М., Ричка Д. О., Федіна В. Г., Кім М. С. ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ВИРОБНИЧИХ ЗАВДАНЬ.....	8
Бекетов О. В., Лаухін Д. В., Ракаєв О. М., Тиквенко П. А., Кузнєцов С. В. ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ТОВЩИНОЮ МЕТАЛОПРОКАТУ ТА ПАРАМЕТРАМИ СТРУКТУРНОГО СТАНУ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ.....	16
Білоконь А. І., Кислиця Л. В., Фільченко К. М., Фільченко Д. М., Макаров А. В. ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ В ГАЛУЗІ ПРОМИСЛОВОГО СТАЛЕВОГО БУДІВНИЦТВА.....	25
Бубон С. Л., Рєзнік Д. В. ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОКЛІМАТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ОФІСНИХ ПРИМІЩЕНЬ ТИПУ OPEN SPACE ПІДЗЕМНОГО РОЗТАШУВАННЯ.....	38
Воробйов В. В., Шило О. С. АРХІТЕКТУРНО-МІСТОБУДІВНИ АСПЕКТИ МОДЕЛЕЙ СІМЕЙ МАЙБУТНЬОГО ЯК ФАКТОРИ ТРАНСФОРМАЦІЇ СЕЛІТЕБНИХ ТЕРИТОРІЙ.....	45
Гаркуша В. С., Симонов С. І., Максимюк О. І. ЛЕГКІ ШВИДКОМОНТОВАНІ КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ ЗВЕДЕННЯ СПОРУД ГРОМАДСЬКОГО І ПРОМИСЛОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....	61
Кокошув О. П., Самченко Р. В., Юхименко А. І. АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ПРИ ВЛАШТУВАННІ ГВИНТОВИХ ПАЛЬ У РІЗНИХ РЕГІОНАХ УКРАЇНИ.....	67
Левченко Н. М., Помазан М. Д., Чечель М. В., Нескородова О. В., Скачков Р. О. ОПТИМІЗАЦІЯ ДЕМОНТАЖУ ТА ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ У РАМКАХ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ.....	73
Михайлик Д. В., Соколов І. А. СУЧАСНІ ЦИФРОВІ ПІДХОДИ ДО ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗВЕДЕННЯ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД.....	82
Нікіфорова Т. Д., Федін В. А. МОЖЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ СКОРОЧЕННЯ ВИКИДІВ CO ₂ В АТМОСФЕРУ БУДІВЕЛЬНОЮ ГАЛУЗЗЮ.....	90
Русанова І. В., Захарова С. О., Рижова І. С., Харченко К. С. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА НОВІ ПІДХОДИ В МЕМОРІАЛІЗАЦІЇ ПОДІЙ РОСІЙСЬКО-УКРАЇНСЬКОЇ ВІЙНИ ЗАСОБАМИ АРХІТЕКТУРИ ТА ДИЗАЙНУ.....	97
Сазанішвілі З. В., Мацюк І. М., Вернер І. В., Поваляєва В. О. ІНТЕГРАЦІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА ЦИФРОВИХ РІШЕНЬ У ПІДГОТОВКУ СТУДЕНТІВ ІНЖЕНЕРНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ.....	108
Соловей Д. В., Шевченко Д. П., Верба А. П., Соколенко О. В., Загрунний В. С., Ільєв І. М. ФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛІВ.....	115

Сопільняк А. М., Пилипенко О. В., Нємцева Т. О., Олейников В. М., Біляєва М. С. ВПРОВАДЖЕННЯ ІННОВАЦІЙНИХ СВІТОВИХ ТЕНДЕНЦІЙ ЗД-СКАНУВАННЯ ПРИ ПОБУДОВІ ОБ'ЄМНОЇ МОДЕЛІ ЛІЩЕЮ № 15 В МІСТІ ДНІПРО.....	123
Узлов К. І., Солоненко Л. І., Воронко Ю. С., Білий А. П., Кімстач Т. В. АНАЛІЗ НОРМАТИВНИХ ВИМОГ ТА ДІАГРАМ ФАЗОВИХ РІВНОВАГ БРОНЗ СИСТЕМИ Cu–Sn–Si.....	132
Шарков В. В., Нестерова О. В., Нагорна О. К., Нечитайло М. П. ВИБІР СХЕМИ ДОДАТКОВОГО ЖИВЛЕННЯ ВОДОПРОВІДНИХ МЕРЕЖ.....	140
Левицька О. Г., Русакова Т. І., Долженкова О. В., Золотько О. В., Войтенко Ю. В. ВИКОРИСТАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ВІДХОДІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ САРКОФАГУ ТА ПРОВЕДЕННЯ РЕМОНТНО-БУДІВЕЛЬНИХ РОБІТ В ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ	146
Савицький І. Д., Ротт Н. О., Мацюк І. М. ІННОВАЦІЙНИЙ ПРОЄКТ БУДИНКУ З ВПРОВАДЖЕННЯМ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	152

CONTENT

Bezruk T.I., Kuzmenko A.O., Haidar A.M., Rychka D.O., Fedina V.G., Kim M.S. APPLICATION OF MATHEMATICAL TECHNOLOGIES TO SOLVING PRODUCTION PROBLEMS.....	8
Beketov O.V., Laukhin D.V., Rakaev O.M., Tykvenko P.A., Kuznetsov S.V. APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING TO ANALYZE THE INTERRELATIONSHIP BETWEEN ROLLED METAL THICKNESS AND STRUCTURAL STATE PARAMETERS OF LOW-CARBON LOW-ALLOY STEELS.....	16
Bilokon A.I., Kyslytsia L.V., Filchenko K.M., Filchenko D.M., Makarov A.V. MAIN TRENDS AND PROSPECTS IN THE INDUSTRIAL STEEL CONSTRUCTION INDUSTRY	25
Bubon S. L., Ryznyk D.V. RESEARCH OF MICROCLIMATIC INDICATORS OF OPEN SPACE TYPE OFFICE PREMISES UNDERGROUND.....	38
Vorobiov V.V., Shylo O.S. ARCHITECTURAL AND URBAN PLANNING ASPECTS OF FUTURE FAMILY MODELS AS FACTORS OF THE TRANSFORMATION OF RESIDENTIAL AREAS.....	45
Harkusha V.S., Simonov S.I., Maksymyuk O.I. LIGHT QUICK-ASSEMBLED STRUCTURES FOR CONSTRUCTION FOR PUBLIC AND INDUSTRIAL PURPOSES.....	61
Kokoshuyev O.P., Samchenko R.V., Yukhymenko A.I. ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN THE INSTALLATION OF SCREW PILES IN VARIOUS REGIONS OF UKRAINE.....	67

Levchenko N.M., Pomazan M.D., Chechel M.V., Neskorodova O.V., Skachkov R.O. OPTIMIZATION OF DEMOLITION AND REUSE OF CONSTRUCTION MATERIALS WITHIN THE FRAMEWORK OF A CIRCULAR ECONOMY.....	73
Mykhailyk D.V., Sokolov I.A. MODERN DIGITAL APPROACHES TO ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SUPPORT FOR THE CONSTRUCTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES.....	82
Nikiforova T.D., Fedin V.A. OPPORTUNITIES AND PROSPECTS FOR REDUCING CO ₂ EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE BY THE CONSTRUCTION INDUSTRY.....	90
Rusanova I.V., Zakharova S.O., Ryjova I.S., Kharchenko K.S. MODERN PROBLEMS OF MEMORIALIZATION OF THE EVENTS OF THE RUSSIAN-UKRAINIAN WAR BY ARCHITECTURAL AND DESIGN MEANS.....	97
Sazanishvili Z.V., Matsiuk I.M., Verner I.V., Povaliaieva V.O. IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE PRODUCTS IN THE EDUCATIONAL PROCESS OF MASTER'S TRAINING.....	108
Solovei D.V., Shevchenko D.P., Verba A.P., Sokolenko O.V., Zahrunnyi V.S., Iliev I.M. FRACTAL ANALYSIS OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF METALS.....	115
Sopilniak A.M., Pylypenko O.V., Niemtseva T.O., Oleinykov V.M., Belyaeva M.S. IMPLEMENTATION OF INNOVATIVE WORLD TRENDS 3D-SCANNING IN THE CONSTRUCTION OF A 3D MODEL OF LYCEUM NO. 15 IN THE CITY OF DNIPRO.....	123
Uzlov K.I., Solonenko L.I., Voronko Yu.S., Bilyi A.P., Kimstach T.V. ANALYSIS OF REGULATORY REQUIREMENTS AND PHASE EQUILIBRIUM DIAGRAMS OF BRONZES OF THE Cu–Sn–Si SYSTEM.....	132
Sharkov V.V., Nesterova O.V., Nahorna O.K., Nechytailo M.P. SELECTION OF ADDITIONAL POWER SUPPLY SCHEME FOR WATER NETWORKS.....	140
Levytska O.H., Rusakova T.I., Dolzhenkova O.V., Zolotko O.V., Voytenko J.V. USE OF BUILDING MATERIALS FROM WASTE FOR THE MANUFACTURE OF A SARCOPHAGUS AND CARRYING OUT REPAIR AND CONSTRUCTION WORKS IN THE EXCLUSION ZONE.....	146
Savytskyi I.D., Rott N.O., Matsiuk I.M. INNOVATIVE BUILDING PROJECT WITH THE IMPLEMENTATION OF ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES.....	152

УДК 669.017:519.21

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.08.1186

ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ВИРОБНИЧИХ ЗАВДАНЬ

БЕЗРУК Т. І.¹,
КУЗЬМЕНКО А. О.²,
ГАЙДАР А. М.^{3*}, канд. техн. наук, доц.,
РИЧКА Д. О.⁴, канд. юрид. наук, доц.,
ФЕДІНА В. Г.⁵, ст. викл.,
КІМ М. С.⁶

¹ Дніпровський ліцей № 31 «Пріоритет» Дніпровської міської ради, вул. Фабрично-заводська, 22, 49055, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 633-64-44, e-mail: infokaterinoslav@gmail.com

² Дніпровський ліцей № 31 «Пріоритет» Дніпровської міської ради, вул. Фабрично-Заводська, 22, 49089, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 125-64-43, e-mail: onino12345@gmail.com

^{3*} 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 (096) 367-70-57, e-mail: nastuel_gaidar@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8993-1458

⁴ Кафедра публічного управління та права, 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) 561-81-00, e-mail: rychka.denys@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0001-0207-907X

⁵ 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 (096) 593-37-31, e-mail: fedina.violetta@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0005-0085-4721

⁶ ДТЕЛ № 61 «ЕРУДИТ» Дніпровської міської ради, вул. Василя Сліпака, 50, 49033, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 439-10-25, e-mail: sunmoonlife24@gmail.com

Анотація. Вступ. Формування якості масивних металевих виробів залежить від широкого спектра чинників, що значно ускладнює процес їхнього аналізу із застосуванням неруйнівних методів контролю. У зв'язку з тим, що фрактальна теорія забезпечує більш гнучкий та достовірний підхід до дослідження структур складних об'єктів різної природи, у даній роботі розглянуто перспективи її використання для оцінки металевої мікроструктури. **Методика.** У дослідженні використано підхід математичного моделювання якісних характеристик прокатних валків із чавуну шляхом аналізу фрактальної розмірності їхніх структурних елементів. Для обчислення фрактальної розмірності було розроблено та реалізовано спеціалізовану методику, яка дозволяє кількісно оцінити складові мікроструктури металу. **Практичне значення.** Встановлено, що механічні характеристики чавунних валків мають виражену залежність від фрактальної розмірності таких елементів, як перліт, карбіди та графіт. Найвища чутливість міцнісних показників спостерігається щодо карбідної та графітової фаз. Запропонований підхід дав змогу побудувати математичну модель, що дозволяє прогнозувати фізико-механічні властивості валків із точністю 5–7 %, ґрунтуючись на розмірнісних характеристиках найбільш впливових мікроструктурних компонентів. **Висновки.** Доведено, що застосування фрактального аналізу до оцінювання внутрішньої будови чавунних валків дозволяє формалізувати критерії їхньої якості у вигляді математичної моделі, що враховує структуру окремих фаз матеріалу. Створено неруйнівний метод контролю, що дозволяє прогнозувати якість чавунних валків завдяки аналізу їх будови з використанням теорії фракталів. Подібний підхід дозволяє заощаджувати кошти на реалізацію механічних іспитів, що зменшує часово-матеріальні витрати на контроль якості чавунних валків.

Ключові слова: моделювання; метал; будова; теорія фракталів; якість чавуну

APPLICATION OF MATHEMATICAL TECHNOLOGIES TO SOLVING PRODUCTION PROBLEMS

BEZRUK T.I.¹,
KUZMENKO A.O.²,
HAIDAR A.M.^{3*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
RYCHKA D.O.⁴, Cand. Sc. (Legal Sciences), Assoc. Prof.,
FEDINA V.G.⁵, Sen. Lect.,

KIM M.S.⁶

¹ Dnipro Lyceum no. 31 "Prioritet" of the Dnipro City Council, 22, Fabrychno-Zavodska St., Dnipro, 49055, Ukraine, tel. +38 (067) 633-64-44, e-mail: infokaterinoslav@gmail.com

² Dnipro lyceum no. 31, "Prioritet" of the Dnipro City Council, 22, Fabrichno-Zavodska St., Dnipro, 49089, Ukraine, tel. +38 (099) 463-58-62, e-mail: onino12345@gmail.com

³ Department of Construction Technologies, 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) 367-70-57, e-mail: nastuel_gaidar@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8993-1458

⁴ Department of Public Administration and Law, 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) 367-70-57, e-mail: rychka.denys@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0001-0207-907X

⁵ Department of Construction Technologies, 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) 593-37-31, e-mail: fedina.violetta@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0005-0085-4721

⁶ DTEL no. 61 "ERUDY" DCR, 22, Vasyl Slipak St., Dnipro, 49033, Ukraine, tel. +38 (067) 439-10-25, e-mail: sunmoonlife24@gmail.com

Abstract. Introduction. The formation of quality in massive metal products is influenced by a wide range of factors, which significantly complicates their evaluation using non-destructive testing methods. Given that fractal theory offers a more flexible and reliable framework for analyzing the structure of complex systems of various natures, this study explores the potential of applying fractal analysis to the assessment of metallic microstructures. **Methodology.** This research employs a mathematical modeling approach to predict the quality characteristics of cast iron rolls based on the analysis of the fractal dimension of their structural components. A specialized methodology was developed and implemented to calculate the fractal dimension, allowing for a quantitative assessment of the microstructural elements of the metal. **Practical Significance.** The study established a strong correlation between the mechanical properties of cast iron rolls and the fractal dimension of specific structural phases such as pearlite, carbides, and graphite. The highest sensitivity of mechanical strength indicators was observed with respect to the fractal characteristics of the carbide and graphite phases. The proposed approach enabled the construction of a predictive mathematical model that estimates the physical and mechanical properties of rolls with an accuracy of 5–7 %, based on the dimensional parameters of the most influential microstructural constituents. **Conclusions.** It has been demonstrated that the application of fractal analysis to the internal structure of cast iron rolls allows for the formalization of quality criteria in the form of a mathematical model that accounts for the structural configuration of individual phases. A non-destructive method has been developed that enables prediction of cast iron roll quality through structural analysis utilizing fractal theory. This approach offers cost-efficiency by reducing the need for mechanical testing, thereby minimizing time and material expenses associated with quality control processes.

Keywords: modeling; metal; structure; fractal theory; cast iron quality

Вступ. У сучасному металознавстві неруйнівні методи контролю (НМК) відіграють ключову роль у забезпеченні якості, надійності та безпеки металевих виробів і конструкцій. Їхня унікальна перевага полягає в можливості дослідження матеріалів без порушення їх цілісності, що є надзвичайно важливим як у виробничих процесах, так і на етапі експлуатації [1; 2].

Оскільки властивості металів визначаються не лише хімічним складом, а й особливостями мікро- та макроструктури, НМК дозволяють отримати критично важливу інформацію про внутрішній стан матеріалу, включаючи наявність дефектів, неоднорідностей, залишкових напружень і мікроструктурних особливостей [3; 4]. Зокрема, такі методи, як ультразвуковий, рентгенографічний, магнітний,

вихрострумний та акустико-емісійний контроль, дають змогу виконувати точну діагностику металевих компонентів у реальному часі та в умовах експлуатаційного навантаження.

У контексті наукових досліджень НМК відкривають можливості для вивчення еволюції структури під впливом термічної чи механічної обробки, а також для кореляції мікроструктурних параметрів з експлуатаційними характеристиками. Зокрема, інноваційні підходи, такі як використання фрактального аналізу або машинного навчання у поєднанні з НМК, значно розширюють межі діагностики матеріалів і дають змогу формувати нові критерії оцінювання їхнього стану [5–7].

Крім того, НМК мають визначальне значення у стратегічних галузях, таких як

авіація, енергетика, машинобудування та оборонна промисловість, де навіть незначні дефекти можуть призвести до катастрофічних наслідків. Відповідно, впровадження таких методів забезпечує не лише економічну ефективність за рахунок зменшення відходів і продовження ресурсу деталей, але й гарантує високий рівень техногенної безпеки.

Таким чином, неруйнівні методи контролю є не лише інструментом технічного моніторингу, але й невід'ємною частиною фундаментальних досліджень у галузі металознавства, сприяючи глибшому

розумінню взаємозв'язку між структурою і властивостями металів.

З метою мінімізації витрат на оцінювання якісних характеристик металів у роботі запропоновано застосування фрактальної теорії, яка зарекомендувала себе як ефективний інструмент для аналізу структури та властивостей різноманітних матеріалів [8; 9].

Методика. В роботі досліджувався вплив фрактальної розмірності елементів структури чавуну марки СПХН (рис. 1) для виробництва валків на показники їх твердості.



Рис. 1. Чавунні валки виконання СПХН

Валки, виготовлені з чавуну марки СПХН-45, СПХН-50 класифікуються як сортопрокатні (С) за функціональним призначенням. Структура цього матеріалу характеризується наявністю пластинчастого графіту (П), а робочий шар валків легований хромом (Х) і нікелем (Н), що позначено у маркуванні відповідними індексами.

Чавунні валки СПХН-45, СПХН-50 широко використовуються для

виготовлення валків чорнових клітей дрібно-, середньосортних та трубопрокатних станів, а також валків обжимних і чорнових клітей сортопрокатних ліній. У межах цього дослідження було проаналізовано, яким чином структурні характеристики згаданої марки чавуну впливають на її механічні властивості – зокрема, на твердість.

У таблиці 1 представлено дані про хімічний склад чавунів після двох плавок, без застосування термічної обробки.

Таблиця 1

Хімічний склад чавунів по масі в %

Марка валку	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
СПХН-47	3,10	0,90	0,69	0,120	0,035	0,72	1,27	0,30
СПХН-45	2,92	0,82	0,64	0,111	0,035	0,77	1,18	0,27

Чавунні валки, виготовлені з матеріалу марки СПХН-45, СПХН-47 характери-

зуються наступними геометричними параметрами: один з валків має бочку

діаметром 540 мм при довжині 1000 мм, інший – бочку діаметром 680 мм при такій самій довжині, тобто 1100 мм. Відповідні розміри представлені у форматі 540×1000 мм та 680×1100 мм.

У таблиці 2 подано результати вимірювання твердості досліджуваних зразків, що були отримані згідно з методом

Шора, передбаченим стандартом ГОСТ 23273-78. Експериментальні випробування проводилися на Дніпровському заводі прокатних валків (ДЗПВ). Для забезпечення репрезентативності даних твердості, вимірювання здійснювалися в трьох контрольних точках, розміщених рівномірно вздовж довжини бочки кожного валка.

Таблиця 2

Твердість чавуну за методом Шора

Чавун марки СПХН-47		Чавун марки СПХН-45	
№ зразка	Твердість бочки валків, HSD	№ зразка	Твердість бочки валків, HSD
1	50	1	49
2	49	2	48
3	48	3	47
4	51	4	48
5	47	5	47
6	50	6	46
7	49	7	48

На рисунку 2, *а-г* представлено мікроструктуру досліджуваного чавуну. За результатами мікроскопічного аналізу встановлено, що матеріал являє собою перлітний чавун, частка перліту в якому становить приблизно 77–82 %. Сплав є мікролегованим хромом і нікелем, що

сприяє підвищенню механічних властивостей та термостійкості. У структурі також виявлено до 2,5 % пластинчастого графіту, який рівномірно розподілений у металевій матриці, та карбіди заліза типу Fe_3C , концентрація яких коливається в межах 15–20 %.

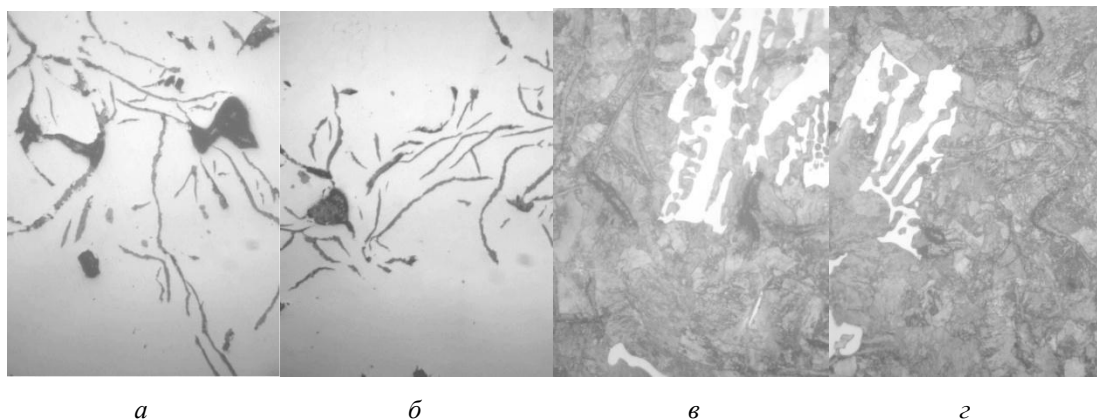


Рис. 1. Мікроструктура чавуну бочки валка виконання СПХН-45 (*а, в*), СПХН-47 (*б, г*) на відстані 8 мм від поверхні: форма пластинчатий графіт (*а, б*); колонії ледебуриду, пластинчатий графіт та перлітна матриця (*в, г*), $\times 200$

Розмірність фрактальна D структурних складових валкового чавуну СПХН визначалася за кінтинним методом Хаусдорфа:

$$D = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(\delta)}{\ln \delta}, \quad (1)$$

де $N(\delta)$ – кількість кліток, якими покривається структура; δ – лінійний розмір клітини [9].

Практичне значення. Фрактальна геометрія, яка розвинулась на перетині математики, фізики та теорії складних систем, дедалі активніше використовується у матеріалознавстві для моделювання та аналізу структурної організації матеріалів. Її основна перевага полягає у здатності адекватно описувати складні, ієрархічно організовані об'єкти, структура яких характеризується самоподібністю, нерівномірністю та відсутністю характерного масштабу – властивостями, типовими для багатьох мікроструктурних елементів металів, композитів, кераміки та інших матеріалів [10–12].

Однією з ключових фрактальних характеристик є фрактальна розмірність [13–15], яка дозволяє кількісно оцінити складність структури. У контексті металознавства це надає можливість чисельно описувати морфологію фазових складових, таких як зерна, включення, пори, карбіди, графітові включення тощо, що раніше оцінювались лише якісно або за спрощеними метричними показниками [16; 17]. Встановлення кореляцій між фрактальною розмірністю структурних елементів і експлуатаційними властивостями матеріалів (міцністю, твердістю, зносостійкістю, тріщиностійкістю) відкриває нові можливості для прогнозування поведінки матеріалів за допомогою математичних моделей [18–20].

Зокрема, у випадку вивчення чавунів, фрактальний підхід дозволяє визначити зв'язок між геометричними характеристиками графітових включень і механічними властивостями виробу. Подібні підходи успішно використовуються для оцінювання неоднорідностей у зварних швах, прогнозування росту тріщин у металі під дією втомного навантаження, аналізу пористих структур тощо. Завдяки цьому фрактальний аналіз стає інструментом не лише опису, а й інформативної діагностики,

що дає змогу з високою точністю передбачати зміну характеристик матеріалів в умовах експлуатації або обробки [21].

Крім того, фрактальні методи добре інтегруються з сучасними цифровими технологіями аналізу зображень, що дозволяє автоматизувати процедуру обробки мікроструктурних знімків, забезпечуючи об'єктивність та високу повторюваність результатів. Це особливо актуально у контексті сучасного тренду до цифровізації контролю якості матеріалів і впровадження індустрії 4.0.

Таким чином, фрактальна геометрія виступає потужним інструментом у прогностичному аналізі якості матеріалів, забезпечуючи як глибше розуміння структури, так і створення ефективних моделей для контролю та управління технологічними процесами [22].

У межах цього дослідження було проведено аналіз залежностей між фрактальними розмірностями основних структурних компонентів чавуну – графіту, перліту та карбідів – та показниками твердості матеріалу.

На рисунку 2 (а–в) наведено графічні інтерпретації взаємозв'язків між фрактальними розмірностями відповідних фаз і значеннями твердості, отриманими експериментально. Результати аналізу свідчать про виражену кореляцію між просторовою складністю (тобто фрактальністю) морфології графіту й перліту та твердістю чавуну. Зокрема, найбільш тісний зв'язок встановлено для графіту – коефіцієнт детермінації становить $R^2 = 0,95$, що вказує на лінійну залежність твердості від фрактального параметра графітової фази. Для перліту коефіцієнт детермінації трохи нижчий – $R^2 = 0,92$, проте також свідчить про високий ступінь впливу його фрактальної розмірності на механічні характеристики сплаву.

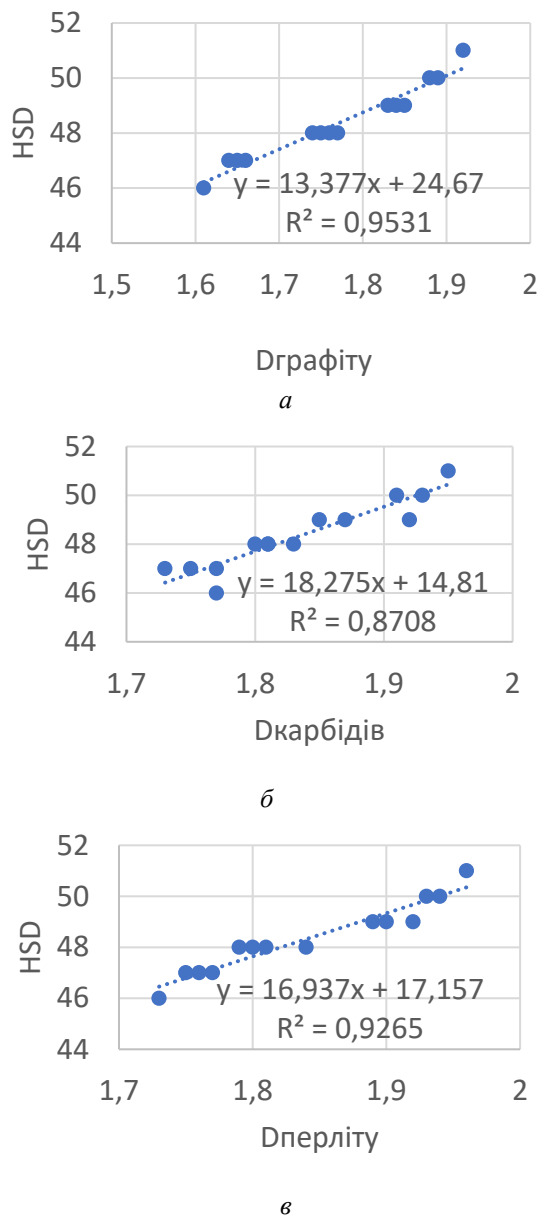


Рис. 2. Залежність показників твердості чавуну марки СІХН-45, СІХН-47 від фрактальної розмірності D – графіту (а); карбідів (б); перліту (в)

Карбідна фаза демонструє відносно нижчий ступінь кореляції, хоча й досить

значущий – $R^2 = 0,87$. Це може пояснюватися як меншою варіативністю просторової організації карбідів, так і складністю точної ідентифікації їх меж у мікроструктурі при цифровому аналізі зображень. Однак навіть за таких умов фрактальна розмірність цієї фази зберігає прогностичну здатність щодо твердості.

На підставі отриманих результатів було побудовано фрактальні моделі прогнозування твердості металу, яка враховує комплексну морфологічну характеристику структури. Середнє значення відносної похибки моделей становить менше ніж 6 %, що підтверджує їх високу точність та придатність для практичного використання в технологічному контролі матеріалів.

Висновки

Запропоновано фрактально-орієнтований підхід до оцінки якості чавунних валків, що полягає у кількісному визначенні взаємозв'язку між фрактальною складністю структурних елементів мікроструктури й механічними властивостями, зокрема твердістю. Отримані результати демонструють, що фрактальні розмірності графіту, перліту та карбідів можуть служити інформативними параметрами для побудови моделей прогнозування якості литих виробів. Таким чином, фрактальний аналіз мікроструктури може розглядатися як перспективний інструмент для інтеграції в системи контролю властивостей та оптимізації структури матеріалів прокатного призначення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hlushkova D. B., Bagrov V. A., Demchenko S. V., Volchuk V. M., Kalinin O. V., Kalinina N. E. Structure and properties of powder gas-plasma coatings based on nickel. *БАИТ*. 2022. № 4 (140). Pp. 125–130.
2. Uzlov O., Bolshakov V. Investigation of acicular ferrite structure in HSLA steel. Proceedings of the “Materials Week 2002”. Frankfurt : Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2002. Pp. 14–20. URL: www.irbis-nbuv.gov.ua/cgiirbis_64.exe?
3. Дубров Ю. И., Волчук В. Н., Большаков В. И. Применение экспертной информации при формировании активного эксперимента в материаловедении. *Моделирование и оптимизация в материаловедении : матер. к 40-й междунар. сем. по моделированию и оптимизации композитов*. Одесса : АстроПринт, 2001. С. 25–26.

4. Дубров Ю., Большаков В., Волчук В. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий : монография. Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2015. 236 с. URL: <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>
5. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. О применении фрактального формализма при математическом описании структур. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2016. № 2. С. 26–33. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/27-33>
6. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. К вопросу о постановке задачи идентификации фрактальной структуры металла. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. № 5. С. 35–39. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/68905/63995>
7. Большаков В., Волчук В., Дубров Ю. Пути применения теории фракталов : монография. Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2016. 146 с.
8. Volchuk V., Dubrov Yu. Ways of compensation of incomplete formal axiomatics in identification of complex objects. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2018. № 4. С. 31–35. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.261218.31.562>
9. Gödel K. Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I. *Monatshefte für Mathematik und Physik*. 1931. Vol. 38. № 1. Pp. 173–198.
10. Большаков Вад. І., Большаков В. І., Волчук В. М., Дубров Ю. І. Часткова компенсація неповноти формальної аксіоматики при ідентифікації структури металу. *Вісник НАН України*. 2014. № 12. С. 45–48. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/73434>
11. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Материаловедческие аспекты применения частичной компенсации неполноты формальной аксиоматики. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2015. № 5. С. 10–16. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/47385/43497>
12. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature : monograph. Nev-Yuork, San Francisco : Freeman, 1982. 480 p. URL: <http://www.amazon.com/Fractal-Geometry-Nature-Benoit-Mandelbrot/dp/0716711869>
13. Zhuravel' I. M., Svir'ska L. M. Measurement of the mean grain size in a metal by using fractal dimensions. *Materials Science*. 2010. Vol. 46. № 3. Pp. 418–420.
14. Zhuravel' I. M. Computer Analysis of the Distribution of Grain Sizes in the Structure of 12Kh1MF Steel After Operation. *Materials Science*. 2019. Vol. 55. № 2. Pp. 187–192.
15. Bol'shakov V., Volchuk V., Dubrov Yu. Fractals and properties of materials : monograph. Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. 140 p. URL: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>
16. Bolshakov V. I., Volchuk V. M., Dubrov Yu. I. Regularization of One Conditionally III-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallfizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018. Vol. 40, № 9. Pp. 1165–1171. URL: [DOI: 10.15407/mfint.40.09.1165](https://doi.org/10.15407/mfint.40.09.1165)
17. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Топологические и фрактальные инварианты структуры для оценки качества металла. *Доповіді НАН України*. 2017. № 4. С. 42–48. URL: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.04.00>
18. Волчук В. Н. Разработка и исследование метода определения качественных характеристик металла на основе анализа фрактальной размерности его микроструктуры : дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.02.01. Днепропетровск, 2003. 186 с.
19. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Применение фрактального моделирования при оценке структуры и свойств металлов. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2018. № 1. С. 50–55. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.240418.50.105>
20. Volchuk V., Klymenko I., Kroviakov S., Orešković M. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism. *Tehnički glasnik – Technical Journal*. 2018. Vol. 12. № 2. Pp. 93–97. URL: <https://hrcak.srce.hr/202359>
21. Волчук В. Н. К вопросу о применении теории мультифракталов для оценки механических свойств металла. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2014. № 3. С. 12–19. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/12-19>
22. Волчук В. М. Модель оцінювання твердості чавунних валків СПХН-43 та СШХНФ-47. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 4. С. 22–35. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.241219.22.597>

REFERENCES

1. Hlushkova D.B., Bagrov V.A., Demchenko S.V., Volchuk V.M., Kalinin O.V. and Kalinina N.E. Structure and properties of powder gas-plasma coatings based on nickel. *VANT*. 2022, no. 4 (140), pp. 125–130.
2. Uzlov O. and Bolchakov V. Investigation of Acicular Ferrite Structure in HSLA Steel. Proceedings of the “Materials Week 2002”. Frankfurt : Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2002, pp. 14–20. URL: [www.irbis-nbuv.gov.ua /.../ cgiirbis_64.exe?](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgiirbis_64.exe?)

3. Dubrov Yu.I., Volchuk V.N. and Bol'shakov V.I. *Primeneniye ekspertnoy informatsii pri formirovaniy aktivnogo eksperimenta v materialovedenii* [Application of expert information in the formation of an active experiment in materials science]. *Modelirovanie i optimizaciya v materialovedenii : mater. k 40-j mezhdunar. sem. po modelirovaniyu i optimizacii kompozitov* [The Modeling and Optimization in Materials Science : Proc. of the 40th International Seminar on Modeling and Optimization of Composites]. Odessa, 2001, pp. 25–26. (in Russian)..
4. Dubrov Yu., Bolshakov V. and Volchuk V. *Puti identifikatsii periodicheskikh mnogokriterial'nykh tekhnologiy* [Road periodic identification of multi-criteria Technology]. Saarbrucken : Palmarium Academic Publishing, 2015, 236 p. URL: <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects> (in Russian).
5. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O primenenii fraktal'nogo formalizma pri matematicheskom opisani struktury* [The fractal application formalism in mathematical description of the structure]. *Metall Science and Heat Treatment of Metals*. 2016, no. 2, pp. 26–33. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/27-33> (in Russian).
6. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *K voprosu o postanovke zadachi identifikatsii fraktal'noy struktury metalla* [Statement on the issue of the problem identification of fractal metal structures]. *Visnyk Prydniprov's'koy derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2016, no. 5, pp. 35–39. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/68905/63995> (in Russian).
7. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Puti primeneniya teorii fraktalov* [Ways of applying the theory of fractals]. Saarbrucken : Palmarium Academic Publishing, 2016, 146 p. (in Russian).
8. Volchuk V. and Dubrov Y. Ways of compensation of incomplete formal axiomatics in identification of complex objects. *Metall Science and Heat Treatment of Metals* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2018, no. 4, pp. 31–35. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.261218.31.562>
9. Gödel K. Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I. *Monatshefte für Mathematik und Physik*. 1931, vol. 38, no. 1, pp. 173–198. (in Germany).
10. Bol'shakov V.I., Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Chastkova kompensatsiya nepovnoty formal'noyi aksiomatyky pry identyfikatsiyi struktury metalu* [The partial compensation of incompleteness of formal axiomatics in the identification of the metal structure]. *Visnyk akademiyi nauk Ukrayiny* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2014, no. 12, pp. 45–48. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/73434> (in Ukrainian).
11. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Materialovedcheskiye aspekty primeneniya chastichnoy kompensatsii nepolnoty formal'noy aksiomatiki* [Material aspects of use of partial compensation of incompleteness of formal axiomatics]. *Visnyk Prydniprov's'koy derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprov's'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2015, no. 5, pp. 10–16. URL : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/47385/43497> (in Ukrainian).
12. Mandelbrot B. B. *The Fractal Geometry of Nature*. New-Yuork, San Francisco Freeman, 1982, 480 p.
13. Zhuravel' I.M. and Svirs'ka L.M. Measurement of the mean grain size in a metal by using fractal dimensions. *Materials Science*. 2015, vol. 46, no. 3, pp. 418–420.
14. Zhuravel' I.M. Computer Analysis of the Distribution of Grain Sizes in the Structure of 12Kh1MF Steel After Operation. *Materials Science*. 2019, vol. 55, no. 2, pp. 187–192.
15. Bolshakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p. URL: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>
16. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. Regularization of One Conditionally ill-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metall of fizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018, vol. 40, no 9, pp. 1165–1171. URL: DOI: [10.15407/mfint.40.09.1165](https://doi.org/10.15407/mfint.40.09.1165)
17. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Topologicheskkiye i fraktal'nyye invarianty struktury dlya otsenki kachestva metalla* [Topological and fractal invariants of a structure to assess the quality of a metal]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2017, no. 4, pp. 42–48. (in Russian).
18. Volchuk V.M. *Rozroblennia i doslidzhennia metodu vyznachennia yakisnykh kharakterystyk metalu na osnovi analizu fraktalnoi rozmirnosti yoho mikrostruktury : diss. na soisk. uchen. step. kand. tehn. nauk : 05.02.01* [Development and research of the method for determining the qualitative characteristics of a metal on the basis of an analysis of the fractal dimension of its microstructure : Candidate Dissertation for Technical Sciences (05.02.01 – Materials Science)]. Dnipropetrovsk, 2003, 186 p. (in Ukrainian).
19. Bol'shakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Primeneniye fraktal'nogo modelirovaniya pri otsenke struktury i svoystv metallov* [Application of fractal modelling at the estimation of the structure and properties of metals]. *Metall Science and Heat Treatment of Metals*. 2018, no. 1, pp. 50–55. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.240418.50.105> (in Russian).
20. Volchuk V., Klymenko I., Kroviakov S. and Orešković M. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism. *Tehnički glasnik – Technical Journal*. 2018, vol. 12, no. 2, pp. 93–97.

21. Volchuk V.N. *K voprosu o primenenii teorii mul'tifraktalov dlya otsenki mekhanicheskikh svoystv metalla* [On the application of the theory of multifractals for the evaluation of the mechanical properties of a metal]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 3, pp. 12–19. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/12-19> (in Russian).

22. Volchuk V.M. *Model' otsinyuvannya tverdosti chavunnykh valkiv CIIХH-43 ta CIIХHФ-47* [Model of assessment of the hardness of the iron rollers CIIХH-43 and CIIХHФ-47]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 3, pp. 12–19. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.241219.22.597> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 21.08.2025.

УДК 620.181.4:691.714

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.16.1187

ЗАСТОСУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ МІЖ ТОВЩИНОЮ МЕТАЛОПРОКАТУ ТА ПАРАМЕТРАМИ СТРУКТУРНОГО СТАНУ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

БЕКЕТОВ О. В.^{1*}, докт. техн. наук, доц.,
ЛАУХІН Д. В.², докт. техн. наук, проф.,
РАКАЄВ О. М.³, ст. викл.,
ТИКВЕНКО П. А.⁴, асп.,
КУЗНЕЦОВ С. В.⁵, асп.

^{1*} Кафедра фундаментальних і природничих дисциплін, 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) 604-61-86, e-mail: beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

² Кафедра фундаментальних і природничих дисциплін, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 585-54-29, e-mail: Laukhin.D.V@nmu.one, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

³ Кафедра експлуатації та ремонту машин, 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) 682-10-96, e-mail: rakaiev.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0001-3173-0140

⁴ Кафедра матеріалознавства та обробки 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 (050) 650-90-22, e-mail: pavel.mt72@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-7481-2191

⁵ Кафедра матеріалознавства та обробки 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 (050) 650-90-22, e-mail: sunreal69@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-4769-0725

Анотація. З точки зору фізики, основна задача при аналізі технічних систем полягає у визначенні реального стану системи з повної множини допустимих, шляхом проведення відповідного комплексу досліджень. При цьому, постає можливість використання як натурних об'єктів так і їх імітації, тобто моделей. При застосування натурного експерименту засоби експериментального дослідження взаємодіють безпосередньо з об'єктом (зразком), який досліджується. При модельному експерименті випробування проводяться не з самим зразком, а з його заміником – моделлю. З іншого боку, з точки зору прикладного матеріалознавства, прикладом системи «чорна скриня» може бути залежність параметрів, які характеризують структурний стан металопродукату (розміри структурних складових, їх відсотковий вміст тощо) від його геометричних властивостей (товщина металопродукату). Отже, сенс будь-якого моделювання полягає в спроможності за результатами дослідів, які проведено на моделях, отримувати якісні та кількісні взаємозв'язки між фізичними величинами, які визначають поведінку системи в натурних умовах. При цьому, застосування замість експериментальних зразків їх моделей дозволяє суттєво знизити собівартість натурних експериментальних досліджень. Таким чином, виходячи з принципів побудови моделей подібного типу, актуальним є розробка методик їх застосування для вирішення низки прикладних задач сучасного матеріалознавства. **Мета статті** – отримання математичної моделі взаємозв'язку між параметрами структурного стану та товщиною металопродукату з низьковуглецевих низьколегованих сталей. **Висновок.** Отримано математичні моделі взаємозв'язку між параметрами структурного

стану та товщиною металопрокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей. Мікроструктурний аналіз показав, що мікроструктурними складовими усіх досліджуваних систем є ферит та перліт. Зі збільшенням товщини збільшується відсотковий вміст феритної складової з одночасним зменшенням кількості перліту. При цьому, спостерігається зріст розмірів структурних складових. На підставі отриманих кількісних даних щодо залежності параметрів структурного стану від товщини металопрокату було побудовано відповідні регресійні моделі. Аналіз моделей показує, що аналізовані залежності мають нелінійний характер і описуються логарифмічними рівняннями типу $Y = b_0 + b_1 \times \log_{10}(x)$. Адекватність отриманих регресійних моделей перевіряли з застосуванням квазіньютонівського методу залишків (графічним методом). Проведений аналіз показав, що регресійні моделі є достатнім ступенем адекватності описують залежності, які досліджені.

Ключові слова: структурний стан; математичне моделювання; товщина металопрокату; низьковуглецева низьколегована сталь; однопараметричний регресійний аналіз; множинний регресійний аналіз

APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING TO ANALYZE THE INTERRELATIONSHIP BETWEEN ROLLED METAL THICKNESS AND STRUCTURAL STATE PARAMETERS OF LOW-CARBON LOW-ALLOY STEELS

BEKETOV O.V.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
LAUKHIN D.V.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
RAKAEV O.M.³, *Ass. of Prof.*,
TYKVENKO P.A.⁴ *PhD Stud.*,
KUZNETSOV S.V.⁵, *PhD Stud.*

^{1*} Department of Fundamental and Natural Sciences, 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) 604-61-86, e-mail: beketov.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-0664-0327

² Engineering and Generative Design Department, Dnipro University of Technology, 19, Dmytro Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel +38 (050) 585-54-29, e-mail: d.v.laukhin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9842-499X

³ Department of Construction and Road Machinery, 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) 682-10-96, e-mail: rakaiev.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0001-3173-0140

⁴ Department of Materials Science and Processing, 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) 650-90-22, e-mail: pavel.mt72@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-7481-2191

⁵ Department of Materials Science and Processing, 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) 650-90-22, e-mail: sunreal69@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-4769-0725

Abstract. From the point of view of physics, the main task in the analysis of technical systems is to determine the real state of the system from the full set of permissible ones, by conducting an appropriate set of studies. In this case, it becomes possible to use both full-scale objects and their imitations, that is, models. When using a full-scale experiment, the means of experimental research interact directly with the object (sample) being studied. In a model experiment, tests are carried out not with the sample itself, but with its substitute – a model. On the other hand, from the point of view of applied materials science, an example of a “black box” system can be the dependence of parameters that characterize the structural state of rolled metal (dimensions of structural components, their percentage content, etc.) on its geometric properties (thickness of rolled metal). Therefore, the meaning of any modeling is the ability, based on the results of experiments conducted on models, to obtain qualitative and quantitative relationships between physical quantities that determine the behavior of the system in full-scale conditions. At the same time, the use of their models instead of experimental samples allows to significantly reduce the cost of full-scale experimental research. Thus, based on the principles of building models of this type, it is relevant to develop methods for their application to solve a number of applied problems of modern materials science. **Purpose of the article.** Obtaining a mathematical model of the relationship between the parameters of the structural state and the thickness of rolled metal from low-carbon low-alloy steels. **Conclusion.** Mathematical models of the relationship between the parameters of the structural state and the thickness of rolled metal from low-carbon low-alloy steels were obtained. Microstructural analysis showed that the microstructural components of all the studied systems are ferrite and pearlite. With increasing thickness, the percentage content of the ferrite component increases with a simultaneous decrease in the amount of pearlite. At the same time, an increase in the size of the structural components is observed. Based on the obtained quantitative data on the dependence of the parameters of the structural state on the thickness of the rolled metal, the corresponding regression models were constructed. Analysis

of the models shows that the analyzed dependencies are nonlinear and are described by logarithmic equations of the type $Y = b_0 + b_1 \times \log_{10}(x)$. The adequacy of the obtained regression models was checked using the quasi-Newton method of residues (graphical method). The analysis showed that the regression models describe the dependencies that were investigated with a sufficient degree of adequacy.

Keywords: structural condition; mathematical modeling; rolled metal thickness; low-carbon low-alloy steel; single-parameter regression analysis; multiple regression analysis

Постановка проблеми. З точки зору фізики, основна задача при аналізі технічних систем полягає у визначенні реального стану системи з повної множини допустимих, шляхом проведення відповідного комплексу досліджень. При цьому, постає можливість використання як натурних об'єктів так і їх імітації, тобто моделей. При застосування натурального експерименту засоби експериментального дослідження взаємодіють безпосередньо з об'єктом (зразком), який досліджується. При модельному експерименті випробування проводяться не з самим зразком, а з його заміником – моделлю [1]. Отже, сенс будь-якого моделювання полягає в спроможності за результатами дослідів, які проведено на моделях, отримувати якісні та кількісні взаємозв'язки між фізичними величинами, які визначають поведінку системи в натурних умовах [2]. При цьому, застосування замість експериментальних зразків їх моделей дозволяє суттєво знизити собівартість натурних експериментальних досліджень. Таким чином, виходячи з принципів побудови моделей подібного типу, актуальним є розробка методик їх застосування для вирішення низки прикладних задач сучасного матеріалознавства.

Аналіз публікацій. Процес побудови математичної моделі, у загальному сенсі, складається з дослідження об'єкту, який моделюється і наступної математичної формалізації – отриманні системи математичних рівнянь [3]. За умови, що система, яка моделюється, не змінюється в часі, побудовану модель можливо віднести до класу стаціонарних (вихід залежить тільки від входу). У випадку, коли на початковій стадії було встановлено майже всі зв'язки між елементами системи, це відображається в концептуальній моделі, по якій

відбувається математична формалізація [4]. Зазвичай, статична модель являє собою одне рівняння або систему рівнянь (нерівностей), лінійних чи нелінійних, алгебраїчних чи трансцендентних. Якщо інформації про залежність елементів недостатньо для їх точного аналізу, або зв'язки мають випадковий характер, систему, яка моделюється, можливо розглядати як «чорну скриню» (рис. 1). В цьому випадку виділяються лише вхідні та вихідні параметри, а внутрішні зв'язки вважаються невідомими [5]. Зазвичай намагаються розглядати найпростіший варіант «чорної скрині» систему з однією вихідною величиною (функція відгуку) та декількома вхідними параметрами (факторами).

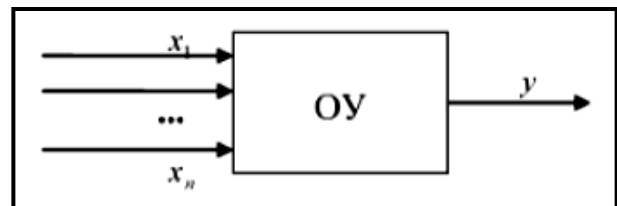


Рис. 1. Концепція «чорної скриньки» [5]

При цьому, залежність вихідної змінної від факторів шукають у вигляді поліному (1):

$$Y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_nx_n, \quad (1)$$

де b_0, b_1, b_n – невідомі коефіцієнти.

Для пошуку значень невідомих коефіцієнтів поліному найчастіше застосовують один з методів параметричної ідентифікації – метод найменших квадратів [6]. Методика застосування цього методу складається з наступних етапів [3; 6]:

- збір статистичних даних про залежність функції відгуку від факторів;
- обробка і інтерпретація цих даних;
- розрахунок варіантів значень параметрів (регресійний аналіз);
- оцінка адекватності (зазвичай за квазіньютонівським методом).

З точки зору прикладного матеріалознавства, прикладом системи «чорна скриня» може бути залежність параметрів, які характеризують структурний стан металопродукату (розміри структурних складових, їх відсотковий вміст тощо) від його геометричних властивостей (товщина металопродукату).

Мета статті – отримання математичної моделі взаємозв'язку між параметрами структурного стану та товщиною металопродукату з низьковуглецевих низьколегованих сталей.

Результати досліджень. Для отримання математичних моделей використовували однофакторний регресійний аналіз, який включав в себе побудову рівняння регресії за методом найменших квадратів і статистичну оцінку результатів. При проведенні регресійного аналізу приймалися наступні припущення:

- вхідний параметр вимірювався з малою помилкою;
- результати спостережень над вихідною величиною являють собою незалежно нормально розподілені випадкові величини;
- при проведенні експерименту з об'ємом вибірки (за умови, що кожен дослід повторений певну кількість разів) вибіркові дисперсії розглядалися як однорідні.

Після отримання рівняння регресії, проводився статистичний аналіз результатів,

який полягав в перевірці значимості всіх коефіцієнтів і встановленні адекватності рівнянь. Перевірку адекватності моделі здійснювали за припущення, що випадкові помилки спостережень є незалежними, нормально розподіленими випадковими величинами з нульовими середніми значеннями і однаковими дисперсіями.

У якості матеріалу для проведення досліджень використовувалась низьковуглецева низьколегована сталь 10Г2ФБ товщиною 16, 20, 30, 40, 50, 70, 100 мм. Для оцінки вхідних параметрів моделі (факторів) частково використовувалися результати, отримані в роботі [7]. Комп'ютерні розрахунки виконувалися з застосуванням пакету прикладних програм StatSoftStatistica [8].

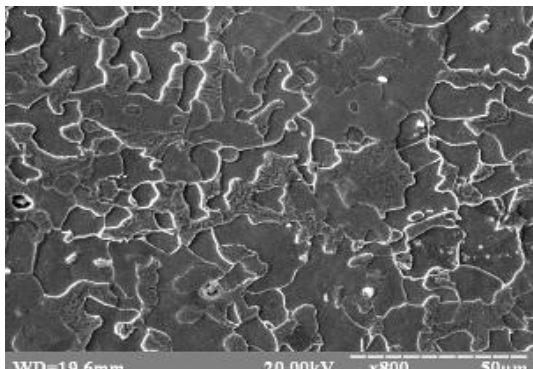
Результати проведеного комплексу мікроструктурних досліджень наведено на рисунку 2.

Проведений комплекс досліджень показав, що всі зразки мають ферито-перлітну структуру. Результати кількісного металографічного аналізу узагальнено та представлено в таблиці 1 (отримано на підставі даних роботи [7]).

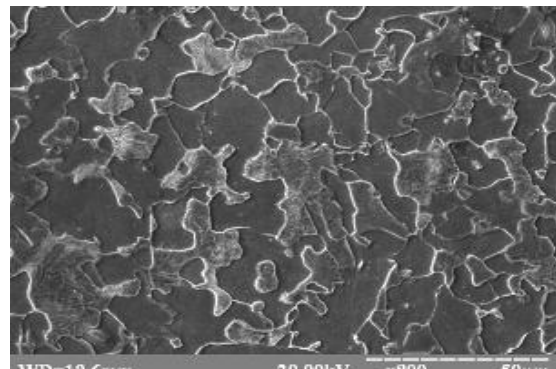
Графічні залежності параметрів структурного стану від товщини металопродукату наведено на рисунку 3.

Отримані аналітичні моделі представлено у таблиці 2.

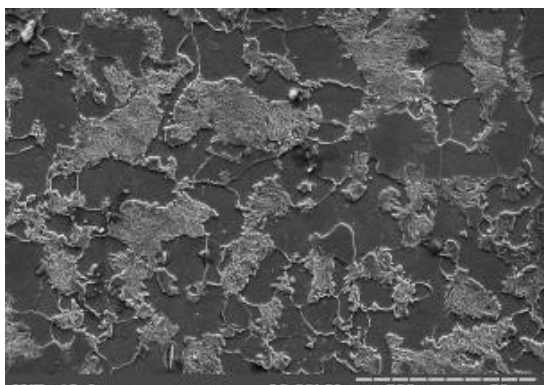
Графічна інтерпретація отриманих моделей представлена на рисунку 4.



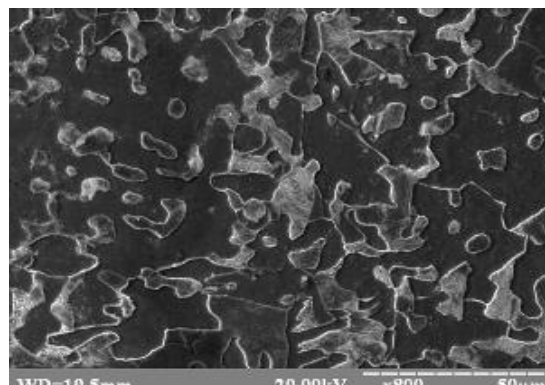
а



б



а



б

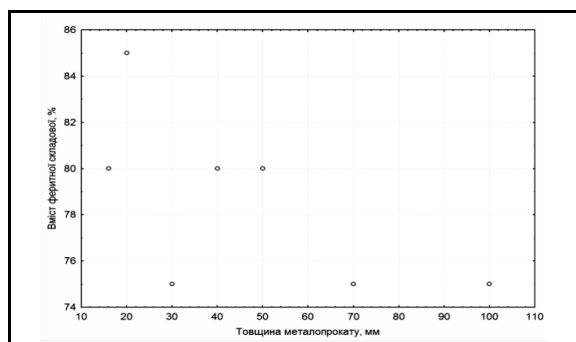
Рис. 2. Структура сталі 10Г2Ф: а – товщина 20 мм; б – товщина 40 мм; в – товщина 70 мм; г – товщина 100 мм

Таблиця 1

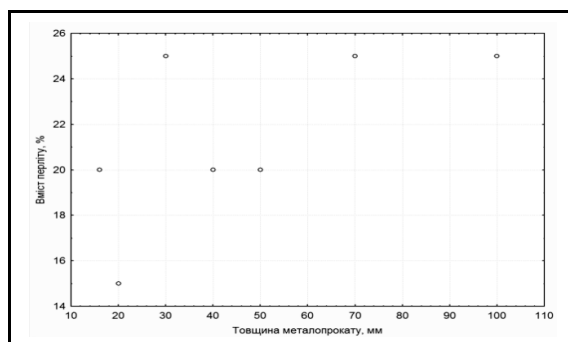
Результати проведеного комплексу мікроструктурних досліджень*

Параметри структурного стану	Товщина металопрокату, мм						
	16	20	30	40	50	70	100
Відсотковий вміст структурних складових, %							
Ферит	80	85	75	80	80	75	75
Перліт	20	15	25	20	20	25	25
Розмір структурних складових, мкм							
Ферит	7	8	9	13	4	15	18
Перліт	7	10	11	13	14	16	17

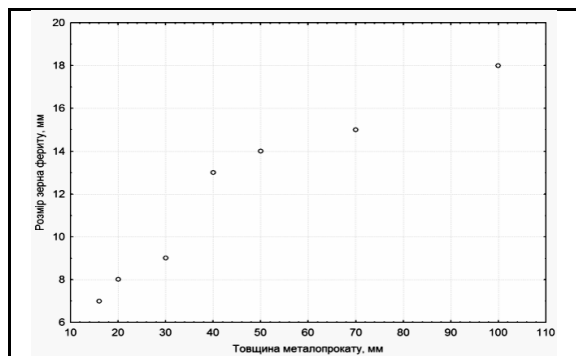
*частково використано результати, отримані в роботі [7]



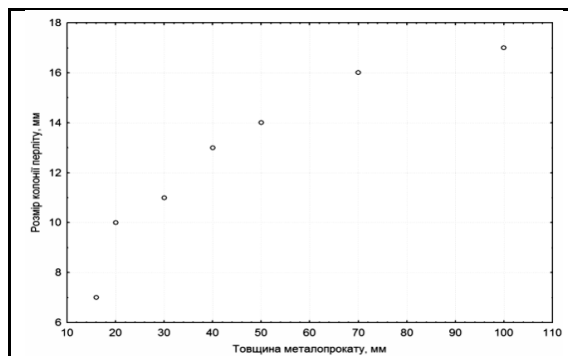
а



б



в



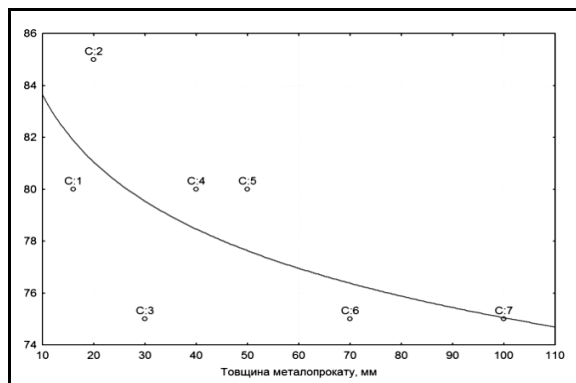
г

Рис. 3. Залежність параметрів структурного стану від товщини металопрокату: а – відсотковий вміст феритної складової; б – відсотковий вміст перлітної складової; в – середній розмір зерен фериту; г – середній розмір колоній перліту

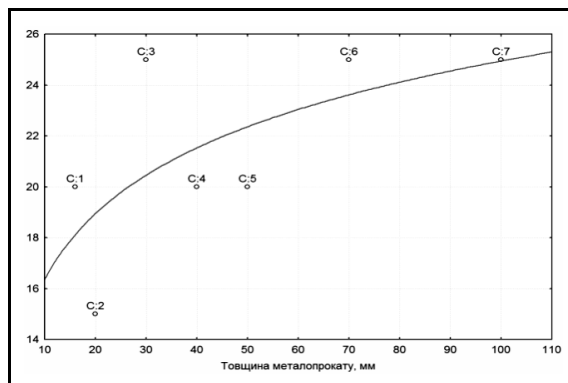
Таблиця 2

Загальні характеристики отриманих математичних моделей

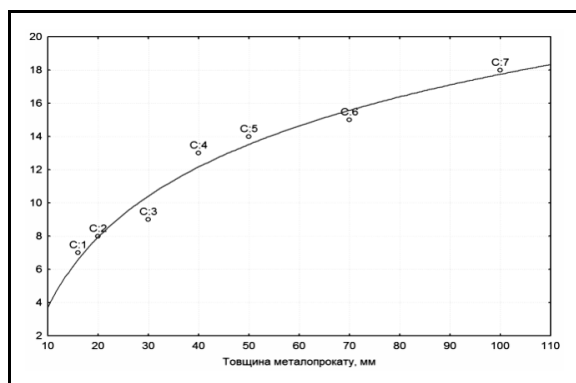
Параметр структурного стану	Рівняння	Коефіцієнти рівняння	
		b_0	b_1
Вміст феритної складової	$\%Fer = b_0 - b_1 \times \log_{10}(x)$	92,2152	8,5822
Вміст перлітної складової	$\%Pear = b_0 + b_1 \times \log_{10}(x)$	7,7848	8,5822
Розмір зерен фериту	$D_{fer} = -b_0 + b_1 \times \log_{10}(x)$	10,3035	14,0264
Розмір колоній перліту	$D_{pear} = -b_0 + b_1 \times \log_{10}(x)$	6,6271	10,0763



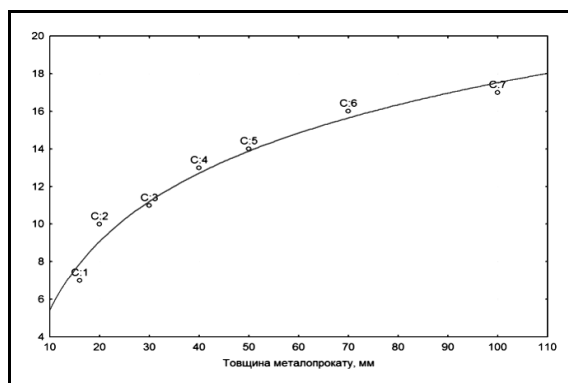
а



б



в



г

Рис. 4. Отримані регресійні моделі залежностей: а – відсотковий вміст феритної складової від товщини металопрокату; б – відсотковий вміст перлітної складової від товщини металопрокату; в – середній розмір зерен фериту від товщини металопрокату; г – середній розмір колоній перліту від товщини металопрокату

Для аналізу адекватності отриманих регресійних моделей в якості методу оцінювання використовується квазіньютон-новський метод залишків (різниць між вихідними значеннями залежної змінної і передбаченими за допомогою моделі). Застосування даної концепції дозволило оцінити ступінь адекватності отриманої моделі графічним методом (графік розподілу залишків на нормальному імовірнісному папері, рис. 5).

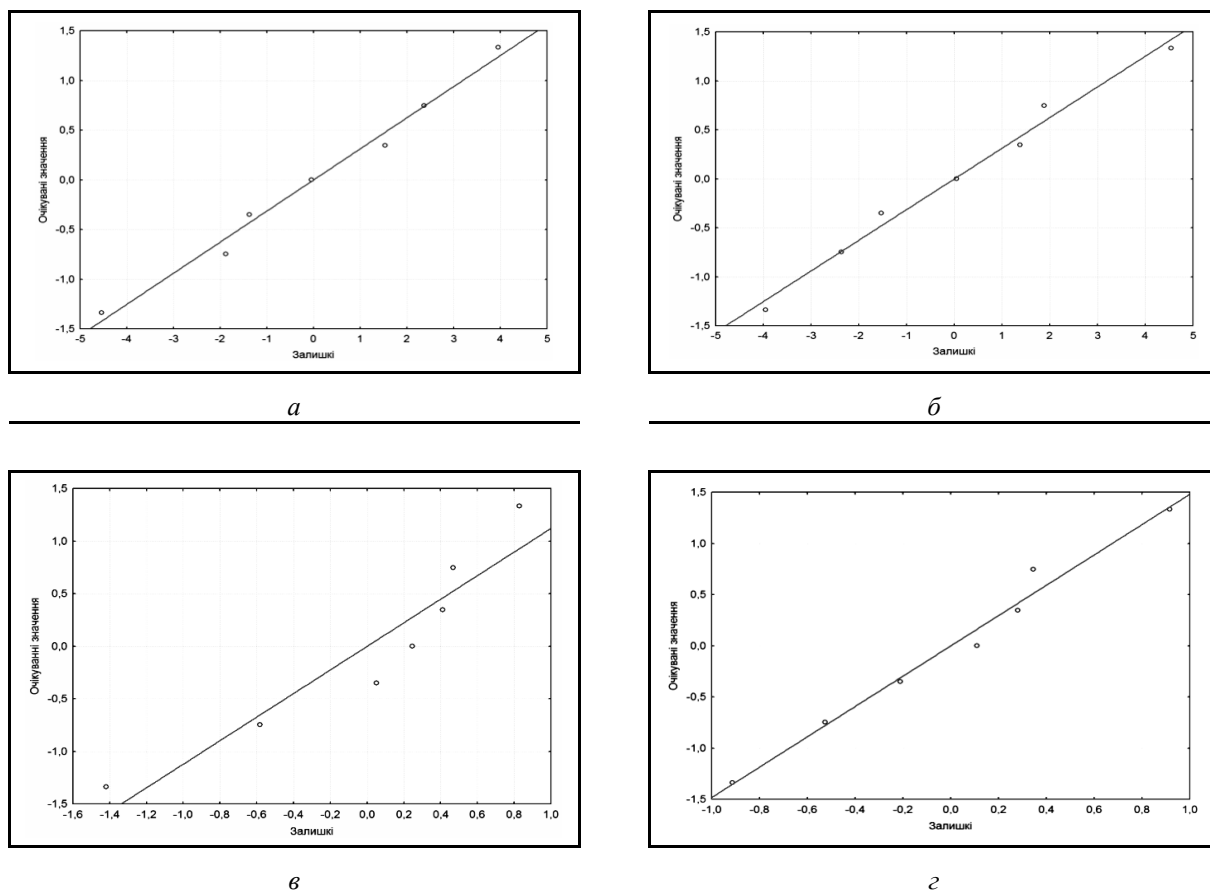


Рис. 5. Розподіл залишків на нормальному ймовірнісному папері: *а* – відсотковий вміст феритної складової; *б* – відсотковий вміст перлітної складової; *в* – середній розмір зерен фериту; *г* – середній розмір колоній перліту

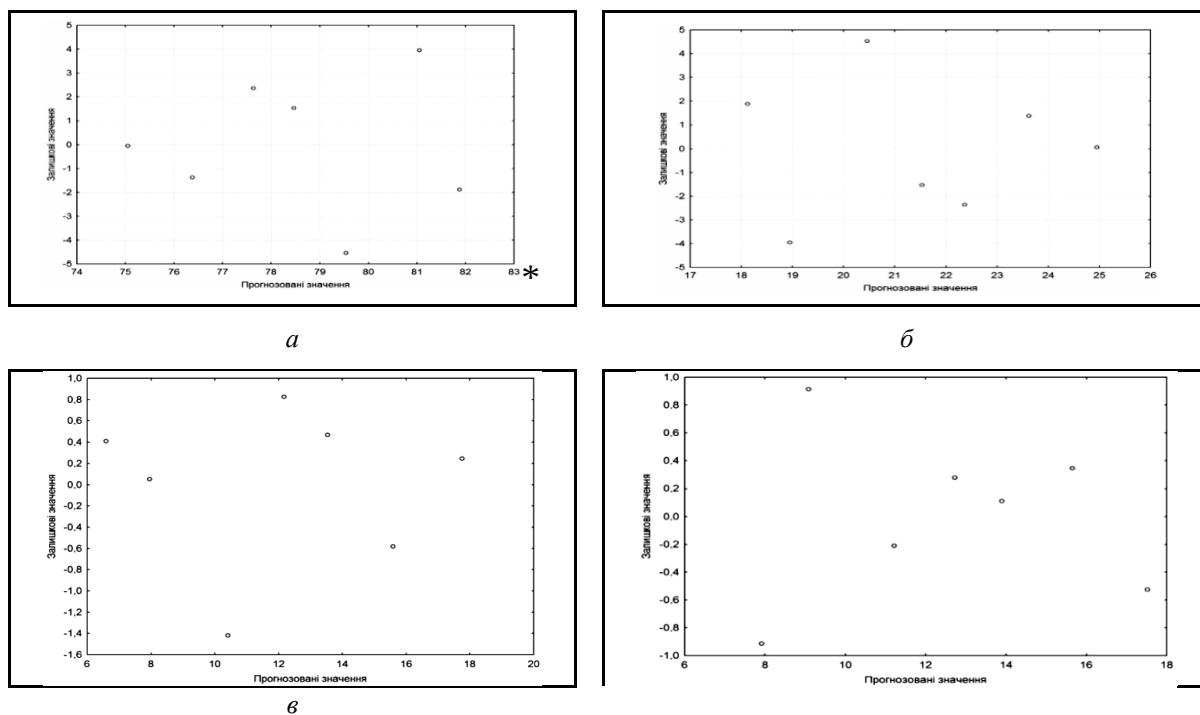


Рис. 6. Графіки розподілу залишків:
а – відсотковий вміст феритної складової;
б – відсотковий вміст перлітної складової;

в – середній розмір зерен фериту;
г – середній розмір колоній перліту

Аналіз наведених графіків показує, що, для всіх моделей, залишки з достатнім ступенем точності лягають на пряму, яка відповідає нормальному закону розподілу. Тому гіпотеза про нормальний розподіл помилок приймається. На рисунку 6 представлені графіки розподілу залишків. З наведених даних випливає, що, для усіх отриманих моделей, залишки хаотично розкидані на площині і в їх поведінці немає закономірностей. Немає підстави говорити, що залишки корелюють між собою. Отже, можна зробити висновок, що регресійні моделі достатньо адекватно описують залежності, які досліджувалися.

Висновки

1. Отримано математичні моделі взаємозв'язку між параметрами структурного стану та товщиною металопрокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей.

2. Мікроструктурний аналіз показав, що мікроструктурними складовими усіх досліджуваних систем є ферит та перліт. Зі збільшенням товщини збільшується відсотковий вміст феритної складової з одночасним зменшенням кількості перліту. При цьому, спостерігається зріст розмірів структурних складових.

3. На підставі отриманих кількісних даних щодо залежності параметрів структурного стану від товщини металопрокату було побудовано відповідні регресійні моделі. Аналіз моделей показує, що аналізовані залежності мають нелінійний характер і описуються логарифмічними рівняннями типу $Y = b_0 + b_1 \times \log_{10}(x)$.

4. Адекватність отриманих регресійних моделей перевіряли з застосуванням квазіньютонівського методу залишків (графічним методом). Проведений аналіз показав, що регресійні моделі є достатнім ступенем адекватності описують залежності, які було досліджено.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ловеїкін В. С. Теорія технічних систем. Київ : ЦП „КОМПРИНТ”, 2017. 291 с. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi78/0058360.pdf>
2. Халатов А. А., Мочалін Є. В., Димитрієва Н. Ф. Основи теорії примежового шару : навч. посіб. для студ. спец. 105 «Прикладна фізика та наноматеріали». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 91 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/7b66a6ee-4371-49d6-909b-999c9b528c71/content>
3. Богданова Н. В., Богданов О. В. Математичне моделювання систем і процесів : конспект лекцій. [Електронний ресурс]. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 84 с. URL: <https://ela.kpi.ua/items/cc0ecc86-f3f6-472c-9550-c84cf780f7cc>
4. Форнальчик Є. Ю., Олісевич М. С., Мاستикаш О. Л., Пельо Р. А. Технічна експлуатація та надійність автомобілів : навч. посіб. Львів : Афіша, 2004. 492 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Fornalchik_2004_492.pdf
5. Кветний Р. Н., Богач І. В., Бойко О. Р., Софіна О. Ю., Шушупа О. М. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень. Частина 1: навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2012. 321 с. URL: <http://kist.ntu.edu.ua/textPhD/kmsp.pdf>
6. Герман В. Ф. Надійність гідромашин і гідроприводів : конспект лекцій. Суми : Сумський державний університет, 2013. 84 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/48593/1/german.pdf;jsessionid=8F8BD039906C1A5C79232CCBB7233033>
7. Бекетов О. В., Лаухін Д. В., Дадіверіна Л. М., Козечко В. І., Тараненко А. О. Дослідження взаємозв'язку між товщиною та структурним станом металопрокату з низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБ. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 2 (020). С. 26–33. URL: <http://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/305431>
8. Програмний комплекс StatSoftStatistika. URL: <https://statsoft.com>

REFERENCES

1. Loveikin V.S. *Teoriia tekhnichnykh system* [Theory of technical systems]. Kyiv : TsP “KOMPRYNТ”, 2017, 291 p. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi78/0058360.pdf> (in Ukrainian).
2. Khalatov A.A., Mochalin Ye.V. and Dymytrieva N.F. *Osnovy teorii prymezhovoho sharu : navchalnyi posibnyk dlia studentiv spetsialnosti 105 “Prykladna fizyka ta nanomaterialy”* [Fundamentals of boundary layer theory: a textbook

for students of specialty 105 “Applied Physics and Nanomaterials”]. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho Publ., 2019, 91 p. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/7b66a6ee-4371-49d6-909b-999c9b528c71/content> (in Ukrainian).

3. Bohdanova N.V. and Bohdanov O.V. *Matematychnе modeliuвання system i protsesiv : konspekt leksii* [Mathematical modeling of systems and processes : lecture notes]. Kyiv : KPI im. Ihoria Sikorskoho Publ., 2022, 84 p. URL: <https://ela.kpi.ua/items/cc0ecc86-f3f6-472c-9550-c84cf780f7cc> (in Ukrainian).

4. Fornalchik Ye.Yu., Olishevych M.S., Mastykash O.L. and Pelo R.A. *Tekhnichna ekspluatatsiia ta nadiinist avtomobiliv : navch. posibnyk* [Technical operation and reliability of cars : a training manual]. Lviv : Afisha, 2004, 492 p. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2021/Fornalchik_2004_492.pdf (in Ukrainian).

5. Kvietnyi R.N., Bohach I.V., Boiko O.R., Sofyna O.Yu. and Shushura O.M. *Kompiuterne modeliuвання system ta protsesiv. Metody obchyslen. Chastyna 1 : navchalnyi posibnyk* [Computer modeling of systems and processes. Computational methods. Part 1 : tutorial]. Vinnytsia : VNTU Publ., 2012, 321 p. URL: <http://kist.ntu.edu.ua/textPhD/kmsp.pdf> (in Ukrainian).

6. Herman V.F. *Nadiinist hidromashyn i hidropryvodiv : konspekt leksii* [Reliability of hydraulic machines and hydraulic drives : lecture notes]. Sumy : Sumskiy State University Publ., 2013, 84 p. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/48593/1/german.pdf;jsessionid=8F8BD039906C1A5C79232CCBB7233033> (in Ukrainian).

7. Beketov O.V., Laukhin D.V., Dadiverina L.M., Kozechko V.I. and Taranenko A.O. *Doslidzhennia vzaïmozv'язku mizh товshchynoïu ta strukturnym stanom metaloprokatu z nyzkovuhletsevoi nyzkolehovanoi stali 10H2FB* [Research on the relationship between the thickness and structural condition of rolled metal from low-carbon low-alloy steel 10G2FB]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2024, no. 2 (020), pp. 26–33. URL: <http://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/305431> (in Ukrainian).

8. *Prohramnyi kompleks StatSoftStatistika* [StatSoftStatistika software package]. URL: <https://statsoft.com> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 01.08.2025.

УДК 691

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.25.1188

ОСНОВНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ В ГАЛУЗІ ПРОМИСЛОВОГО СТАЛЕВОГО БУДІВНИЦТВА

БІЛОКОНЬ А. І.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
КИСЛИЦЯ Л. В.^{2*}, *канд. техн. наук, доц.*,
ФІЛЬЧЕНКО К. М.³, *асп.*,
ФІЛЬЧЕНКО Д. М.⁴, *асп.*,
МАКАРОВ А. В.⁵, *канд. техн. наук*

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 (067) 566-53-14, e-mail: belokon0604@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5229-781X

^{2*} 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) 78-031-78, e-mail: lina_kalynysh@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4563-2530

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 (097) 905-73-90, e-mail: filchenko.kn@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-5864-9992

⁴ 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) 632-75-69, e-mail: FilchenkoDenis@gmail.com, ORCID ID: 0009-0007-8084-5271

⁵ Кафедра цивільної інженерії, технологій будівництва і захисту довкілля, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. Сергія Єфремова, 25, 49009, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 850-34-28, e-mail: makarov.a.v@dsau.dp.ua, ORCID ID: 0009-0000-5052-2411

Анотація. Внаслідок бойових дій, Україна втратила більшу кількість виробничих площ, і для поновлення цієї складової, швидкокомповане сталеве будівництво безперечно є пріоритетним напрямком, що обумовлює актуальність та важливість дослідження. Сучасні сталеві швидкокомповані конструкції дають змогу оновити втрачену та пошкоджену промислову базу, що дозволяє створювати ефективні, економічні та екологічно стійкі будівлі, які відповідають світовим стандартам енергоефективності. У тому числі висока якість зовнішнього огороження, яке використовується в цих будівлях, є запорукою для досягнення енергоефективності, відповідності нормам сталого будівництва. Крім того, будівництво із високомісних сталевих виробів забезпечує ефективне використання сталі в будівництві, а сучасні технології та оптимальне проєктування зведення будівель, забезпечує високі стандарти сталого будівництва, включно з енергоефективністю та безпечною експлуатацією відповідно нормам безпеки та якості. Разом з цим, сталеве будівництво з використанням високомісних швидкокомпованих конструкцій сприяє зменшенню витрат та підвищенню продуктивності монтажу та контролю якості каркасів будівель. Використання нових технологій в сталевому будівництві, таких як комплексність і висока якість збирання попередньо виготовлених елементів, теж сприяє швидкому та ефективному монтажу і забезпечує кращу якість кінцевого результату, створюючи умови продуктивного середовища співпраці між усіма учасниками процесу. В цілому, швидкокомповане сталеве будівництво сприяє підвищенню енергоефективності будівель, забезпечує баланс між екологічною доцільністю та економічною ефективністю. У підсумку, технологія зведення металевих будівель із використанням швидкокомпованих конструкцій підвищує ефективність сталого будівництва, мінімізує ризики в процесі зведення конструкцій, забезпечує якість, довговічність, стійкість та безпеку експлуатації конструкцій на довготривалий час. **Мета роботи** – визначити основні тенденції та перспективи в галузі промислового сталевих будівництва. **Завдання** – проаналізувати найкращі практики в світовому сталевому будівництві та узагальнити і впорядкувати структуру знань з проєктування зведення сталевих конструкцій промислових будівель; визначити основні тенденції, перспективи розвитку сталевих будівництва з використанням швидкокомпованих каркасних конструкцій; визначити регіональні особливості, тенденції та перспективи розвитку сталевих будівництва для сприяння впровадженню передових технологій монтажу сталевих конструкцій в промисловому будівництві. **Результати дослідження:** вирішено завдання оцінки важливості визначальних характерних ознак сталевих будівель, які переважно слід враховувати при розробці концепції регіонального розвитку промислового будівництва.

Ключові слова: швидкокомповані конструкції; сталеве будівництво; проєктування сталевих конструкцій; зведення збірних сталевих будівель; монтаж сталевих каркасних конструкцій

MAIN TRENDS AND PROSPECTS IN THE INDUSTRIAL STEEL CONSTRUCTION INDUSTRY

BILOKON A.I.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
KYSLYTSIA L.V.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
FILCHENKO K.M.³, *Postgrad. Stud.*,
FILCHENKO D.M.⁴, *Postgrad. Stud.*,
MAKAROV A.V.⁵, *Cand. Sc. (Tech.)*

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 (067) 566-53-14, e-mail: belokon0604@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5229-781X

^{2*} 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) 78-031-78, e-mail: lina_kalnysh@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4563-2530

³ Department of Construction Organization and Management, 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) 905-73-90, e-mail: filchenko.kn@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-5864-9992

⁴ Department of Construction Organization and Management, 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) 632-75-69, e-mail: FilchenkoDenis@gmail.com, ORCID ID: 0009-0007-8084-5271

⁵ Department of Civil Engineering, Construction Technologies and Environmental Protection, Dnipro State Agrarian and Economic University, 25, Sergey Efremov St., Dnipro, 49009, Ukraine, tel. +38 (066) 850-34-28, e-mail: makarov.a.v@dsau.dp.ua, ORCID ID: 0009-0000-5052-2411

Abstract. As a result of hostilities, Ukraine lost a large number of production areas, and to restore this component, prefabricated steel construction is undoubtedly a priority area, which determines the relevance and importance of the study. Modern steel precast structures make it possible to renew the lost and damaged industrial base, allowing for the creation of efficient, economical and environmentally sustainable buildings that meet global energy efficiency standards. Including the high quality of the external fencing used in these buildings, it is a guarantee of achieving energy efficiency and compliance with sustainable construction standards. In addition, construction with high-strength steel products ensures the efficient use of steel in construction, and modern technologies and optimal design of building construction ensure high standards of sustainable construction, including energy efficiency and safe operation in accordance with safety and quality standards. At the same time, steel construction using high-strength prefabricated structures helps reduce costs and increase the productivity of installation and quality control of building frames. The use of new technologies in steel construction, such as the complexity and high quality of assembly of prefabricated elements, also contributes to fast and efficient installation and ensures better quality of the final result, creating conditions for a productive environment of cooperation between all participants in the process. Overall, precast steel construction contributes to increasing the energy efficiency of buildings, providing a balance between ecological feasibility and economic efficiency. As a result, the technology of erecting metal buildings using prefabricated structures increases the efficiency of steel construction, minimizes risks in the process of erecting structures, and ensures the quality, durability, stability, and safety of long-term operation of structures. **The purpose of the work** is to identify the main trends and prospects in the field of industrial steel construction. **The task** is to analyze the best practices in global steel construction and summarize and organize the structure of knowledge on the design of steel structures for industrial buildings; to identify the main trends and prospects for the development of steel construction using prefabricated frame structures; to identify regional features, trends and prospects for the development of steel construction to promote the implementation of advanced technologies for the installation of steel structures in industrial construction. **Research results:** the task of assessing the importance of the defining characteristics of steel buildings, which should mainly be taken into account when developing a concept for the regional development of industrial construction, has been solved.

Keywords: *prefabricated structures; steel construction; design of steel structures; erection of prefabricated steel buildings; installation of steel frame structures*

Вступ. Сучасні сталеві швидкокомтовані конструкції дають змогу створювати ефективні, економічні та екологічно стійкі будівлі, що відповідають світовим стандартам енергоефективності.

У тому числі висока якість зовнішнього огороження, яке використовується в цих будівлях, є запорукою для досягнення енергоефективності, задовольняє нормам сталого будівництва.

Крім того будівництво із високоміцних сталевих виробів забезпечує ефективне використання сталі в будівництві, а сучасні технології та оптимальне проєктування зведення будівель, забезпечує високі стандарти сталого будівництва, включно з енергоефективністю та безпечною експлуатацією у відповідності нормам безпеки та якості.

У тому числі, сталеve будівництво з використанням високоміцних швидкокомтованих конструкцій сприяє зменшенню витрат та підвищенню продуктивності монтажу та контролю якості каркасів будівель.

Використання нових технологій в сталевому будівництві, таких як комплексність і висока якість збирання попередньо виготовлених елементів, теж сприяє швидкому та ефективному монтажу і забезпечує кращу якість кінцевого результату, створюючи умови продуктивного середовища співпраці між усіма учасниками процесу.

В цілому, швидкокомтоване сталеve будівництво сприяє підвищенню енергоефективності будівель забезпечує баланс між економічною доцільністю та екологічною ефективністю.

У підсумку, технологія зведення металевих будівель із використанням швидкокомтованих конструкцій підвищує ефективність сталевого будівництва, мінімізує ризики в процесі зведення конструкцій, забезпечує якість, довговічність, стійкість та безпеку експлуатації конструкцій на довготривалий час.

Оскільки Україна, внаслідок бойових дій, втратила більшу кількість виробничих площ, то, для поновлення цієї складової, швидкокомтоване сталеve будівництво безперечно стає пріоритетним напрямком, що обумовлює актуальність дослідження.

Мета даної роботи: Визначити основні тенденції та перспективи в галузі промислового сталевого будівництва.

Об'єкт дослідження: швидкокомтоване сталеve будівництво.

Предмет: визначальні характеристики і ознаки сталевих будівель, які переважно слід враховувати при концептуальному розвитку регіонального сталевого будівництва.

Основні завдання, які поставили перед собою автори:

1. Проаналізувати найкращі практики в світовому сталевому будівництві та узагальнити і впорядкувати структуру знань з проєктування зведення сталевих конструкцій промислових будівель;

2. Визначити основні тенденції, перспективи розвитку сталевого будівництва з використанням швидкокомтованих каркасних конструкцій.

3. Визначити регіональні особливості, тенденції та перспективи розвитку сталевого будівництва для сприяння впровадженню передових технологій монтажу сталевих конструкцій в промисловому будівництві

Аналіз публікацій в галузі сталевого будівництва.

У науковій роботі [1] описані найпоширеніші форми промислових будівель із сталевих конструкцій і великих огорожувальних конструкцій та їх застосування в Європі. Розглянуто регіональні відмінності, які можуть існувати в залежності від практики, нормативних актів та можливостей ланцюга постачань.

Основні завдання, що вирішуються авторами:

– висвітлити кращі світові практики використання сталевих конструкцій у промисловому будівництві;

– сприяння впровадженню передових технологій та підходів до проєктування і монтажу сталевих конструкцій;

– аналіз існуючих тенденцій, вивчення перспектив наступного покоління сталевих будівель.

Основний результат роботи – представлення міркувань щодо концептуального проєктування і тенденцій розвитку сталевого будівництва.

Публікація [2] спрямована на надання рекомендацій щодо найкращих практик у проєктуванні, будівництві та експлуатації одноповерхових сталевих будівель. Вона акцентує увагу на оптимізації процесів

проектування, впровадженні інноваційних рішень, підвищенні енергоефективності та стійкості будівель, а також на поліпшенні співпраці між усіма учасниками будівельного процесу.

Робота вирішує завдання:

- забезпечення ефективного використання сталі в будівництві одноповерхових будівель шляхом застосування сучасних технологій та оптимальних методів проектування;

- поліпшення взаємодії учасників проекту шляхом раннього залучення всіх сторін, таких як клієнти, архітектори, підрядники, постачальники та виробники конструкцій;

- зменшення витрат і підвищення продуктивності завдяки координації між технологіями будівництва, розробці більш ефективних процесів монтажу та контролю якості.

Вивчаючи матеріал, що викладений, можна дійти наступних висновків:

1. Сучасні сталеві конструкції дають змогу створювати ефективні, економічні та екологічно стійкі будівлі, що відповідають сучасним стандартам енергоефективності.

2. Ефективне будівництво одноповерхових будівель вимагає інтеграції всіх процесів – від проектування до фінального введення в експлуатацію.

Важливо, щоб усі учасники розуміли свої взаємозалежності та працювали злагоджено. Раннє залучення постачальників і виробників та інтеграція їхніх знань у процес проектування значно покращують якість будівництва та зменшують витрати, сприяє швидкому та ефективному монтажу, а також забезпечує кращу якість кінцевого результату.

Значну роль у забезпеченні успішного будівництва відіграє наявність досвідчених і компетентних клієнтів (користувачів), які можуть чітко визначити свої вимоги та сприяти створенню продуктивного середовища співпраці між усіма сторонами процесу.

Рекомендації [3] щодо проектування та будівництва стійких, низьковуглецевих складських приміщень були розроблені з

метою допомогти інженерам, архітекторам, девелоперам і власникам складів у впровадженні ефективних та екологічно відповідальних будівельних рішень.

Оптимізація проектування будівель із застосуванням сталі забезпечує баланс між екологічною ефективністю та економічною доцільністю. В підтвердження цього ствердження надано порівняльний аналіз вартості базового варіанту (сталева рама порталу) і альтернативними структурними рішеннями каркасу будівлі. Вартість корпусу складу (включаючи вартість будівельних робіт) на основі клеєних балок та прогонів, що спираються на бетонні колони, у порівнянні з базовим варіантом, складає (+12) відсотків; а варіант (сталевої рами порталу з світловими ліхтарями) перевищує вартість базового варіанту на (+8) відсотків.

Іншим стандартним посібником з монтажу є керівництво для будівельників і монтажників, які працюють зі сталевими швидкокомтованими будівельними конструкціями [4]. У ньому містяться докладні інструкції щодо правильної та безпечної практики монтажу для забезпечення якісного, довговічного та безпечного результату.

Укладачі посібника поставили за мету:

- надати покрокові інструкції з монтажу металевих будівель, включно з підготовкою, доставлянням, зберіганням і встановленням конструкцій;

- забезпечити дотримання стандартних процедур, що сприяють безпечному, ефективному та якісному монтажу;

- забезпечити належне складування і зберігання матеріалів, щоб запобігти пошкодженню і псуванню елементів конструкції;

- дати рекомендації щодо кріплення болтів, кронштейнів та інших елементів для забезпечення стійкості і довговічності конструкції.

Дотримання стандартних методів монтажу має вирішальне значення для безпеки та надійності металевих конструкцій. Використання інструкцій, наведених у цьому посібнику, дає змогу

уникнути помилок і порушень технологічного процесу.

Підсумовуючи вище зазначене можливо прийти до висновку, що успішний монтаж сталевих будівель залежить від ретельного планування, досвіду монтажників і суворого дотримання рекомендованих процедур.

Ще один посібник [5] з монтажу та встановлення швидкомонтованих металевих будівель містить докладні інструкції з підготовки, транспортування, складання та кріплення металевих конструкцій, а також рекомендації з контролю якості та безпеки під час монтажу.

Посібник містить докладні інструкції з монтажу збірних металевих будівель, що визначає якісне та безпечне виконання робіт.

Практичний посібник [6] з планування безпечного зведення сталевих будівель, опублікований Австралійським інститутом сталі у співпраці з Multiplex Constructions Pty Limited, призначений для дотримання високих стандартів безпеки та ефективності під час монтажу сталевих конструкцій на будівельних майданчиках.

Основну увагу в ньому приділено плануванню процесу, управлінню ризиками та дотриманню нормативних вимог. Посібник містить докладний опис основних етапів будівництва, включно з розробленням послідовності монтажу, взаємодією із зацікавленими сторонами та проведенням обов'язкових перевірок.

Посібник побудовано навколо етапів будівельного процесу, фази: концептуальний дизайн; ескізний проєкт; робочий проєкт; робочі креслення; передмонтажні роботи (підготовка будівельного майданчика до проведення основних робіт); виготовлення та транспортування; щоденний монтаж; підписання актів та передача (введення) в експлуатацію. Все це допомагає мінімізувати ризики на етапах будівництва, забезпечує координацію між учасниками будівельного процесу і підвищує якість робіт.

«Збірні конструкції сталеві будівлі» інструкція з монтажу [7], розроблена компанією Mueller Inc, містить інструкції з підготовки майданчика, зведення

конструкцій, ізоляції, монтажу покрівлі та оздоблення.

Інструкція з монтажу збірних сталевих будівель – це комплексне керівництво для будівельників і підрядників. Виконання всіх етапів у суворій відповідності з наведеними рекомендаціями забезпечує довговічність, безпеку і якість конструкції будівлі. У документі підкреслюється важливість правильного планування, використання відповідного обладнання та дотримання технічних норм на всіх етапах будівництва.

Наукове дослідження інтегрованого проєктування збірних сталевих каркасних конструкцій з акцентом на структурну безпеку [8] пропонує підхід до комплексного проєктування збірних сталевих каркасних конструкцій з використанням технологій інформаційного моделювання будівель (BIM). Основною метою дослідження є усунення невідповідностей між 3D-моделями, створеними в BIM-системах, і початковими проєктними розрахунковими рішеннями, що дає змогу забезпечити безпеку та надійність конструкцій.

Дослідження ґрунтується на аналізі загальної безпеки (стійкості) конструкцій, моделюванні з'єднань балок і колон та використанні отриманих результатів для оптимізації проєктування конструкцій:

BIM-платформа виводить 2D-креслення для механічної обробки елементів і вузлів балок та колон конструкції.

Проведене дослідження показує, що комплексне використання BIM-технологій з розрахунковими програмами забезпечує більш точне і безпечне проєктування зірної конструкції будівлі.

Такий підхід підвищує безпеку, точність і ефективність сталевих будівництва, усуває невідповідності між 3D-моделями і реальними технологічними проєктами, забезпечуючи автоматизований контроль критично важливих вузлів будівлі.

Експериментальне дослідження з'єднань болтами збірних сталевих балок каркасу наведено в роботі [9]. Його основна мета – оцінити механічні властивості стійких сталевих рамних балок, дослідити їхню міцність, жорсткість і стійкість до

навантажень, а також визначити оптимальні параметри з'єднання для підвищення ефективності конструкцій.

Результати експериментів підтвердили ефективність деяких схем болтових з'єднань, які забезпечують рівномірний розподіл навантаження і знижують ризик місцевих деформацій.

Виявлено певні розбіжності між теоретичними розрахунками та реальними (фактичними) даними, що вказує на необхідність подальшого вдосконалення методів розрахунку.

Болтові з'єднання істотно впливають на міцність і жорсткість балок, а оптимальне розташування болтів може значно поліпшити експлуатаційні характеристики конструкції. Жорсткість балок може бути збільшена за рахунок оптимізації діаметра болтів, кількості з'єднань і матеріалу кріплення, що знижує прогини під навантаженням.

У статті [10] досліджується вплив інформаційного моделювання будівель (BIM) на будівництво збірних сталевих каркасів з точки зору малих і середніх підприємств (МСП). Основною метою є розробка BIM-орієнтованої системи управління будівництвом, яка допоможе МСП підвищити ефективність проектування, виготовлення та монтажу сталевих каркасів, зменшити витрати та покращити процеси управління проектами.

Впровадження BIM на малих і середніх підприємствах значно підвищує ефективність будівельного процесу, особливо з точки зору скорочення витрат і поліпшення управління ресурсами. BIM дозволяє більш точно прогнозувати обсяги та витрати матеріалів, що знижує ризики перевитрат і помилок під час виготовлення та монтажу сталевих каркасів.

Покращений контроль якості, використання BIM і лазерного сканування дозволяє точно контролювати відповідність побудованих конструктивних елементів будівлі проектним рішенням.

Результати дослідження підтверджують економічну доцільність використання BIM для МСП, особливо в умовах зростаючих вимог до точності та швидкості будівництва.

BIM може значно підвищити ефективність сталевих каркасних будівництв на малих і середніх підприємствах, але його впровадження вимагає додаткових ресурсів, навчання персоналу та адаптації до конкретних умов бізнесу.

Наукове дослідження [11], розглядає застосування технології Digital Twin (DT) у сталевому будівництві сталевих конструкцій. Основна мета – підвищення рівня цифровізації та інтелектуалізації будівельних процесів за рахунок інтеграції BIM, штучного інтелекту і сенсорних систем.

У дослідженні запропоновано архітектуру цифрового двійника, що охоплює всі етапи будівництва сталевих конструкцій. Метод створення цифрового двійника включає три основні етапи:

- збір і передача фізичних даних (інформація про персонал, обладнання, матеріали, навколишнє середовище);
- побудова віртуальної моделі (геометрична, фізична, поведінкова і нормативна моделі);
- обмін інформацією між фізичною та віртуальною моделями (моніторинг, аналіз, прогнозування, управління будівельними процесами).

У документі також наведені реальні приклади застосування цифрового двійника:

- будівництво бібліотеки кампусу в місті Сюньган (Китай);
- реконструкція та розширення аеропорту Наньчжун Гаопін.

Цифровий двійник може значно підвищити ефективність будівництва за рахунок інтеграції даних і автоматизації процесів.

Впровадження технологій цифрового моделювання знижує ризик виникнення структурних дефектів, допомагає прогнозувати небезпеки і мінімізувати затримки. Практичне застосування DT під час будівництва бібліотеки та аеропорту підтвердило ефективність методу, зокрема, у зниженні витрат, підвищенні точності та автоматизації контролю якості. У перспективі – ширше використання штучного інтелекту для автоматизованого ухвалення рішень у процесі будівництва.

Наступна публікація [12] є науковим дослідженням, в якому порівнюються традиційні сталеві будівлі (ТСБ) та швидкомонтовані сталеві будівлі (ШМСБ). Дослідження фокусується на конструктивних особливостях, матеріальних витратах, будівельному процесі, транспортних витратах та загальній ефективності обох підходів.

В рамках дослідження були проведені розрахунки витрат на реальному промисловому об'єкті (25 м × 52,5 м) з використанням двох конструктивних систем – ТСБ та ШМСБ. Були використані методи калькуляції витрат, аналізу ефективності та оцінки часу будівництва.

Аналізувалися технології монтажу традиційних сталевих будівель (ТСБ):

- використання гарячекатаних сталевих профілів постійного перерізу;
- виготовлення конструктивних елементів на заводі, транспортування та подальша обробка на будівельному майданчику;
- монтаж за допомогою зварювання, болтового з'єднання та різання матеріалів безпосередньо на об'єкті;
- велика вага конструкцій, що збільшує навантаження на фундамент.

Дані співставлялися з технологією швидкомонтованих інженерних будівель (ШМСБ):

- легкі металеві каркаси з тонкостінних елементів зі змінним перерізом;
- всі деталі виготовляються на заводі, транспортуються в готовому вигляді і збираються на місці без додаткових модифікацій;
- швидкий монтаж за допомогою болтових з'єднань і мінімального зварювання.

Висновки викладені у дослідженні вказують на те, що:

- ШМСБ є більш економічно ефективними, оскільки вони забезпечують 40 % економію коштів у порівнянні з традиційними сталевими будівлями.
- монтаж ШМСБ відбувається на 30–40 % швидше, що скорочує час будівництва.

- ШМСБ легші, що зменшує навантаження на фундамент і витрати на бетонні роботи.

- вплив ШМСБ на навколишнє середовище нижчий, оскільки вони зменшують кількість будівельних відходів і забезпечують більш ефективне використання ресурсів.

Загалом, ШМСБ є кращим вибором для промислових, комерційних і складських будівель завдяки економії часу, коштів і ресурсів.

Наступний документ [13] є результатом дослідження, в якому розглядається нова методологія проектування та виконання збірних комерційних стінових конструкцій для підвищення продуктивності будівельних процесів. Основною метою дослідження є оптимізація використання збірних стінових панелей для скорочення термінів будівництва, підвищення точності та зменшення трудовитрат.

У цьому дослідженні розроблено модель, яка забезпечує визначену процедуру для проектування та реалізації збірних комерційних стінових конструкцій. Основний внесок цього дослідження в сукупність знань полягає в розробці адаптованої і масштабованої моделі для підвищення продуктивності на будівництві з використанням холодноформованих металевих стін на шпильках.

Модель може бути широко використана як у нових, так і в реконструйованих проектах у вертикальному будівництві.

Виконане дослідження підтверджує ефективність інноваційної моделі у підвищенні продуктивності та якості будівництва комерційних будівель.

Тематичне дослідження будівельних проектів в Окленді [14] аналізує вплив збірного будівництва на продуктивність, витрати і час будівництва.

Основна ідея дослідження полягає в тому, що традиційні методи будівництва (TBS – Traditional Building System) мають ряд обмежень, таких як тривалі терміни виконання робіт, висока залежність від погодних умов та велика кількість відходів. Натомість використання збірних

конструкцій (ЗК) дозволяє знизити витрати, підвищити якість і скоротити час будівництва.

Автори дослідили 66 будівельних проєктів в Окленді, серед яких житлові будинки, комерційні споруди, квартири, освітні та громадські будівлі. Для аналізу ефективності збірних конструкцій були використані наступні параметри:

- загальні витрати;
- тривалість виконання;
- продуктивність.

Дослідження порівнює ЗК з традиційним будівництвом (TBS), використовуючи історичні дані, отримані від будівельних компаній. Збірні конструкції скорочують час будівництва в середньому на 34 % порівняно з традиційними методами. Також завдяки використанню ЗК можна досягти зниження загальних витрат на будівництво на 19 %, що робить їх більш рентабельними.

Найбільше зростання продуктивності (11 %) спостерігалось в житлових проєктах, що свідчить про особливу ефективність ЗК для будівництва житлових будинків. Громадські будівлі показали найбільшу економію коштів (24 %), що свідчить про те, що вони підходять для великих інфраструктурних проєктів.

В роботі [15] аналізується взаємозв'язок між виробництвом збірних конструкцій та їх монтажем на будівельному майданчику. Основною метою є оптимізація будівельного процесу шляхом узгодження графіків виготовлення та монтажу збірних елементів, що мінімізує затримки, зменшує витрати на складування та підвищує ефективність роботи.

Ключові аспекти дослідження:

- використання концепції Just-in-Time (JIT) для синхронізації виробництва та монтажу;
- оптимізація ланцюжка поставок для уникнення простоїв та перевитрат.

- використання математичного моделювання для побудови ефективного робочого графіка;

- аналіз випадкових затримок у виробництві та їх впливу на процес будівництва.

В рамках дослідження також проведено емпіричний аналіз реального будівельного проєкту, що дозволяє оцінити ефективність розробленого методу в реальних умовах. Синхронізація виробництва і збірки конструкцій будівлі значно скорочує час простою як на заводах, так і на будівельному майданчику.

Використання Just-in-Time зменшує складські та транспортні витрати.

Математична модель дозволяє створити ефективний графік робіт, мінімізуючи затримки.

Практичне застосування методу на будівельному майданчику підтвердило можливість скорочення термінів будівництва на 10–20 %, а також оптимізація ланцюга поставок на будівництві сприяє зниженню витрат і поліпшенню організації робіт.

Дослідження рекомендує широке впровадження цього підходу у сфері швидкомонтованого будівництва, що дозволить підвищити ефективність використання ресурсів та зменшити втрати через неузгоджений графік будівництва.

Результати дослідження: На основі аналізу, узагальнень і впорядкування наукових робіт за темою дослідження, визначено предметна область в галузі сталого будівництва і основні напрямки досліджень (табл. 1).

Результати викладених наукових робіт за темою дослідження дозволили сформулювати основні тенденції та перспективи розвитку сталого будівництва (табл. 2).

Таблиця 1

Предметна область досліджень в галузі сталевих будівництва

Напрямки досліджень	Наукові праці
Приклади і аналіз кращих практик в галузі сталевих будівництва	[1]
Інтеграція і оптимізація процесів зведення швидкокомтованих сталевих промислових будівель	[1; 2; 6; 15]
Дослідження структури витрат сталевих будівель і альтернативних проєктів каркасного будівництва	[3]
Покращення ефективності та безпечної практики монтажу сталевих швидкокомтованих каркасів будівель	[4; 5; 7]
Інтегроване проєктування сталевих каркасів на основі BIM-технологій	[8; 10]
Підвищення цифровізації, побудова віртуальної моделі (фізичної, поведінкової)	[11]
Дослідження механічних і геометричних властивостей сталевих конструкцій (з'єднань, балок, рам)	[9]
Порівняльний аналіз будівництва збірних систем швидкокомтованих металевих будівель (ШМБ) з традиційним сталевим будівництвом (ТСБ)	[12–14]

Таблиця 2

Основні тенденції та перспективи сталевих будівництва

Переваги	Проблемні моменти	Концептуальні напрями розвитку*
- Підвищення енергоефективності - Стійкості - Поліпшення співпраці учасників будівельного процесу - Забезпечення ефективності використання сталі в будівництві - Забезпечення оптимального проєктування - Зменшення витрат і підвищення продуктивності - Ефективність, екологічність економічність будівництва - Забезпечення якості довговічності та безпечного результату - Високий рівень стандартизації - Високий рівень безпеки та надійності конструкцій - Мінімізація ризиків - Високий рівень координації співпраці - Забезпечення комплексного проєктування на всіх етапах будівництва	- Визначення оптимальних параметрів з'єднань для забезпечення ефективності конструкції - Необхідність вдосконалення методів розрахунку - Існування невідповідностей розрахункових і реальних характеристик конструкцій і з'єднань, що вказує на необхідність вдосконалення деяких методів розрахунку [9] - Комплексне використання BIM-технологій з розрахунковими програмами, що забезпечує більш точне і загальне проєктування збірної конструкції	- Оптимізація простору - Швидкість будівництва - Доступ і безпека - Гнучкість використання та простору - Екологічні показники - Стандартизація компонентів - Спеціалізована інфраструктура - Сталість - Закінчення терміну експлуатації та повторне використання - Інтеграція послуг - Ландшафтний дизайн - Естетика та візуальний вплив - Теплові характеристики та повітронепроникність - Акустична ізоляція - Атмосферостійкість - Розрахунковий термін служби

*Фактори, рекомендовано враховувати при концептуальному проєктуванні проєктів [1]

Для вирішення завдання оцінки важливості визначальних факторів і ознак для перспективи раціонального розвитку сталевих будівництва доцільно задіяти методи експортного аналізу.

Ухвалення рішень на підставі думок експертів значною мірою залежить від організації формування груп експертів,

процедури аналізу та обробки суджень експертів.

Формування сукупності експертів здійснювалося згідно з їх компетентністю в галузі сталевих будівництва. Для оцінювання компетентності фахівців, які залучались до експертизи враховувалося:

- обізнаність фахівця щодо досліджуваної проблеми;
- практичний досвід, пов'язаний з вирішенням даної проблеми;
- кількість реалізованих проектів, у яких фахівець брав участь на різних етапах;
- участь у семінарах, конференціях та нарадах, як в Україні, так і за кордоном з досліджуваної проблеми;
- здібність до прогнозування і інтуїція фахівця у прийнятті рішень.

Оцінка професійної компетентності фахівців здійснювалась за допомогою попереднього опитування методом анкетування.

Формування сукупності експертів згідно їх професійної компетентності в галузі сталого будівництва виконувалась методом «снігового кому» [16].

У першому наблизенні, за концепцією «снігового кому» ми отримали дані від 20 фахівців щодо самооцінювання на їхню компетентність і обізнаність.

За [17] було розраховано максимальна необхідна кількість експертів для цього дослідження, яка склала $N_{\max} \approx 21$ експерт, мінімальна кількість експертів $N_{\min} \approx 13$ осіб.

Таким чином ми отримали діапазон $N_{\max} = 21$ експерт, $N_{\min} = 13$ експертів.

На основі даних анкетування, які надійшли від 20 фахівців, і попередньої кваліфікації їх професійної компетентності було відібрано 14 експертів з різних областей діяльності, які були поділені на дві групи.

До першої групи увійшли 7 осіб:

– фахівці, які мають значний науковий стаж, наукові праці і неодноразово брали участь у міжнародних науково-практичних семінарах і конференціях за темою дослідження;

– молоді науковці, з числа аспірантів та магістрів, які підвищують свою кваліфікацію, мають практичний досвід і науковий інтерес пов'язаний з розв'язанням невизначених питань в галузі сталого будівництва.

До другої групи увійшли сім осіб із числа:

– керівники інженерно-технічних відділів; лінійний склад виконавців робіт підрядних монтажних організацій, що працюють у сталевому будівництві більше ніж 5 років.

В рамках даного дослідження експерти оцінювали параметри (ознаки) сталевих будівель (склади, промислові виробничі, розподільчі центри, спорткомплекси, виставкові комплекси) в рамках міркувань визначення перспектив щодо концептуального розвитку сталого будівництва з врахуванням регіональних потреб і особливостей.

Тип одноповерхових сталевих будівель і міркування щодо концептуального їх проектування визначено і було запозичено з роботи [1]. В цьому дослідженні автори визначили і оцінили ознаки розвитку сталого будівництва (нового покоління) на якісному (емоційному) рівні, тобто: *важливо; дуже важливо; неважливо.*

В рамках нашого дослідження перед експертами було поставлено завдання оцінити характерні ознаки розвитку сталого будівництва кількісно і скласти пріоритет (рейтинг) їх значимості щодо розвитку і потреб регіонального сталого будівництва.

Із сукупності методів експертної оцінки був задіяний метод попарного порівняння на основі діагональних зворотніх матриць:

– якщо параметри (a_i) у попарному порівнянні мають однакову значимість, їм присвоюється індекс 1;

– якщо один із параметрів (a_i) більш важливий, йому присвоюється індекс 2 (інший приймає значення 1/2);

– якщо один із параметрів (a_i) набагато важливіший, йому присвоюється індекс 3 (відповідно інший приймає значення 1/3).

Кожен з експертів провів ранжування параметрів (в один тур) і обробка матриць (думок експертів) дозволила отримати інтегровану оцінку важливості ознак сталого будівництва на регіональному рівні.

Результат обробки попарної матриці експертів представлено на рисунку.

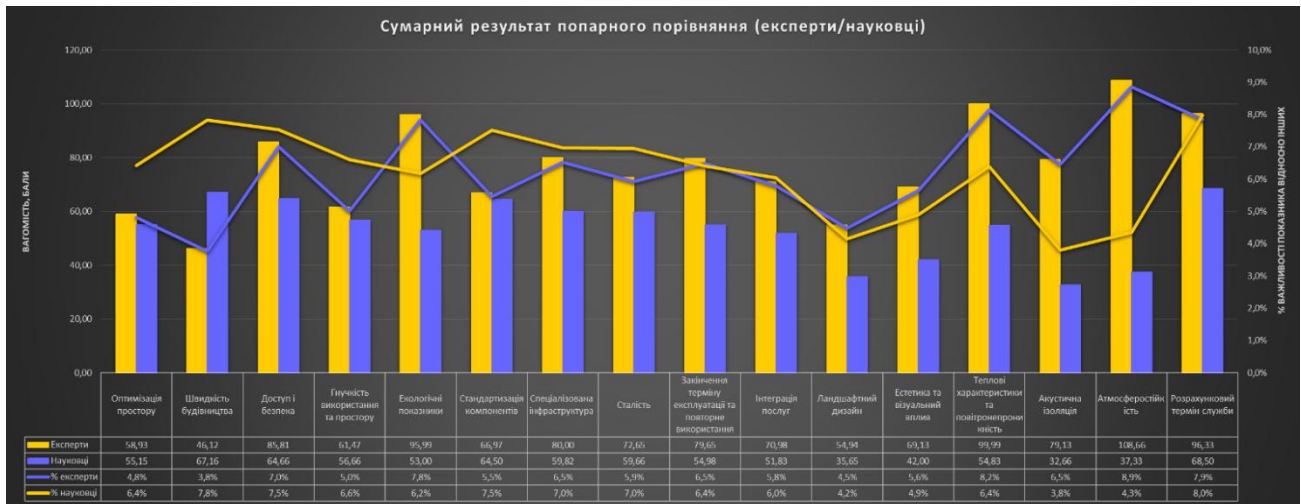


Рис. Сумарний результат попарного порівняння

На основі обробки оцінок експертів було визначено рівень узгодженості думок експертів γ -коефіцієнт варіації розбіжності в оцінках.

Отримані результати дозволили зробити висновок про ступінь згоди в оцінках, яка знаходиться в межах: $0,1 \leq \gamma \leq 0,15$ та $0,15 \leq \gamma \leq 0,25$, що відповідає рівню узгодженості «середньому» та «вище середнього».

Висновок

Вирішено завдання оцінки важливості визначальних характерних ознак сталевих будівель, які переважно враховувати при розробці концепції регіонального розвитку сталевих промислового будівництва.

Показано, що ситуація, в якій опинилась Україна, вимагає поновлення великого обсягу промислових площ, внаслідок завданих руйнувань.

Сучасне сталеve будівництво із використанням швидкокомтованих конструкцій дозволить в короткий термін ефективно і якісно забезпечити ці потреби.

Виконано аналіз наукових праць, що вирішують актуальні питання в галузі швидкокомтованого сталевих будівництва. Узагальнено структуру знань, що впорядковує досягнення в області швидкокомтованих сталевих будівель.

Вирішено завдання оцінки важливості визначальних критичних характеристик і ознак, які переважно враховувати при розробці концепції розвитку сталевих будівництва на регіональному рівні. В першу чергу це такі ознаки як: доступ і безпека; екологічні показники; теплові характеристики та повітронепроникність; атмосферостійкість; розрахунковий термін служби.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Londhe P. M. та ін. A comparative analysis of conventional steel building and pre-engineered building systems: a case study approach. *E3S web of conferences*. 2024. Т. 559. С. 1–12. Р. 04030. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455904030> (дата звернення : 21.03.2025).
2. He R., Zhang Z., Li J. Experimental study on bolt-spliced prefabricated steel frame beams. *Advances in civil engineering*. 2020. Vol. 2020. Pp. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/6191475> (дата звернення: 21.03.2025).
3. Jaskowski P., Biruk S., Krzeminski M. Synchronizing production of precast elements with on-site erection. *Archives of civil engineering*. 2024. Pp. 607–618. URL: <https://doi.org/10.24425/ace.2024.151005> (дата звернення: 21.03.2025).
4. Liu Z., Lin S. Digital twin model and its establishment method for steel structure construction processes. *Buildings*. 2024. Т. 14, № 4. С. 1–17. 1043. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14041043> (дата звернення: 21.03.2025).
5. Renner A., Karatas A., Videan B. Innovative design and execution model for improving productivity of interior prefabricated commercial wall assemblies. *Buildings*. 2022. Vol. 13, № 1. Pp. 1–20. 68. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings13010068> (дата звернення: 21.03.2025).

6. Wang P. та ін. Research on integrated design of prefabricated steel frame structures based on BIM technology with a focus on structural safety. *Buildings*. 2024. Vol. 14, № 8. Pp. 1–20. 2341. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14082341> (дата звернення: 21.03.2025).
7. Shahzad W., Mbachu J., Domingo N. Marginal productivity gained through prefabrication : case studies of building projects in auckland. *Buildings*. 2015. Vol. 5, № 1. Pp. 196–208. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings5010196> (дата звернення: 21.03.2025).
8. Yoo M., Kim J., Choi C. Effects of bim-based construction of prefabricated steel framework from the perspective of smes. *Applied sciences*. 2019. Vol. 9, № 9. Pp. 1–21 1732. URL: <https://doi.org/10.3390/app9091732> (дата звернення: 21.03.2025).
9. Ran He, Zaihua Zhang, Jingchao Li Експериментальне дослідження з'єднаних болтами збірних сталевих каркасних балок. Гобокен : Wiley. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2020/6191475>
10. Mooyoung Yoo, Jaejun Kim, Changsik Choi. Вплив будівництва збірних сталевих каркасів на основі BIM з точки зору МСП. Базель : MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/9/1732>
11. Zhansheng Liu, Sen Lin. Модель цифрових двійників та метод її створення для процесів будівництва сталевих конструкцій. Базель : MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/4/1043>
12. Londhe Pratik M., Ambekar Rohan Vilas, Dhumal Priyanka R., Chipade Amar M. Порівняльний аналіз традиційних сталевих будівель і готових будівельних систем: підхід із прикладного дослідження. Лез-Юліс : EDP Sciences. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2024/89/e3sconf_icstce2024_04030.pdf
13. Andrew Renner, Aslihan Karatas, Benjamin Videan. Інноваційна модель дизайну та виконання для підвищення продуктивності внутрішніх збірних комерційних стінових конструкцій. Базель : MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/1/68>
14. Wajih Shahzad, Jasper Mbachu, Niluka Domingo Гранична продуктивність, досягнута завдяки заводському виготовленню: тематичні дослідження будівельних проектів в Окленді. Базель : MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/5/1/196>
15. Piotr Jaskowski, Sławomir Biruk, Michał Krzeminski Синхронізація виробництва збірних елементів із монтажем на місці. Варшава : Польська академія наук. URL: https://journals.pan.pl/Content/132831/39_2k.pdf
16. Наумов В.О., Білоконь А.І. Створення паспорту об'єкта для цифровізації та підбору сценаріїв демонтажу будівель та споруд. Innovative technologies for training and educating young people : the 2nd International scientific and practical conference (January 14–17, 2025). Boston, USA. International Science Group. 2025. 309 p. ISBN 979-8-89692-744-0; DOI- 10.46299/ISG.2025.1.2.
17. Гнатенко Г. М., Снитюк В. Є. Експертні технології прийняття рішень. Маулаут, Київ 2008, 444 с. URL: https://www.researchgate.net/publication/324015476_Ekspertni_tehnologii_prijnatta_risen

REFERENCES

1. Londhe P.M. and oth. A comparative analysis of conventional steel building and pre-engineered building systems: a case study approach. E3S web of Conferences. 2024, vol. 559, pp. 1–12. 04030. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455904030>
2. He R., Zhang Z. and Li J. Experimental study on bolt-spliced prefabricated steel frame beams. Advances in civil engineering. 2020, vol. 2020, pp. 1–12. URL: <https://doi.org/10.1155/2020/6191475>
3. Jaskowski P., Biruk S. and Krzeminski M. Synchronizing production of precast elements with on-site erection. Archives of Civil Engineering. 2024, pp. 607–618. URL: <https://doi.org/10.24425/ace.2024.151005>
4. Liu Z., Lin S. Digital twin model and its establishment method for steel structure construction processes. Buildings. 2024, T. 14, no. 4, pp. 1–17. 1043. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14041043>
5. Renner A., Karatas A. and Videan B. Innovative design and execution model for improving productivity of interior prefabricated commercial wall assemblies. Buildings. 2022, vol. 13, no. 1, pp. 1–20. 68. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings13010068>
6. Wang P. and oth. Research on integrated design of prefabricated steel frame structures based on BIM technology with a focus on structural safety. Buildings. 2024, vol. 14, no. 8, pp. 1–20. 2341. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14082341> (in Ukrainian).
7. Shahzad W., Mbachu J. and Domingo N. Marginal productivity gained through prefabrication: case studies of building projects in auckland. Buildings. 2015, vol. 5, no. 1, pp. 196–208. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings5010196> (in Ukrainian).
8. Yoo M., Kim J. and Choi C. Effects of bim-based construction of prefabricated steel framework from the perspective of smes. Applied Sciences. 2019, vol. 9, no. 9, pp. 1–21. URL: <https://doi.org/10.3390/app9091732>
9. Ran He, Zaihua Zhang and Jingchao Li. Experimental study of bolted prefabricated steel frame beams. Goboken : Wiley. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2020/6191475>
10. Mooyoung Yoo, Jaejun Kim and Changsik Choi. Effects of BIM-Based Construction of Prefabricated Steel Framework from the Perspective of SMEs. Basel : MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/9/1732>
11. Zhansheng Liu and Sen Lin. Digital Twin Model and Its Establishment Method for Steel Structure Construction Processes. Basel : MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/4/1043>

12. Londhe Pratik M., Ambekar Rohan Vilas, Dhumal Priyanka R. and Chipade Amar M. A Comparative Analysis of Conventional Steel Building and Pre-Engineered Building Systems : a case study Approach : EDP Sciences. URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2024/89/e3sconf_icstce2024_04030.pdf
13. Andrew Rener, Aslihan Karatas and Benjamin Videan. Innovative Design and Execution Model for Improving Productivity of Interior Prefabricated Commercial Wall Assemblies. Basel : MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/1/68>
14. Wajiha Shahzad, Jasper Mbachu and Niluka Domingo. Marginal Productivity Gained Through Prefabrication : Case Studies of Building Projects in Auckland. Basel : MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/5/1/196>
15. Piotr Jaskowski, Sławomir Biruk and Michał Krzeminski. Synchronizing production of precast elements with on-site erection. POLISH ACADEMY OF SCIENCES. URL: https://journals.pan.pl/Content/132831/39_2k.pdf
16. Naumov V.O. and Bilokon A.I. *Stvorennya pasportu ob'yekta dlya tsyfrovizatsiyi ta pidboru stsenariyiv demontazhu budivel' ta sporud* [Creating a passport of an object for digitalization and selection of scenarios for dismantling buildings and structures]. Innovative Technologies for Training and Educating Young People : the 2nd International scientific and practical conference (January 14–17, 2025), Boston, USA. International Science Group, 2025, 309 p. ISBN 979-8-89692-744-0; DOI : 10.46299/ISG.2025.1.2 (in Ukrainian).
17. Hnatenko G.M. and Snityuk V.E. *Ekspertni tekhnolohiyi pryynyattya rishen'* [Expert decision-making technologies]. Kyiv : Maulaut, 2008, 444 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/324015476_Ekspertnitehnologiiprijnattarisen (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 06.05.2025.

УДК 614.8; 725.2; 696.3; 613.6

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.38.1189

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОКЛІМАТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ОФІСНИХ ПРИМІЩЕНЬ ТИПУ OPEN SPACE ПІДЗЕМНОГО РОЗТАШУВАННЯ

БУБОН С. Л.^{1*}, асп.,

РЕЗНИК Д. В.², канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, Київський національний університет будівництва і архітектури, пр. Повітряних Сил, 31, Київ, Україна, тел. +38 (044) 241–55–80, e-mail: bybon_cergey@ukr.net, ORCID ID: 0009–0009–6916–8374

² Кафедра цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, вул. Університетська, 20, Кременчук, Україна, тел. +38 (097) 523–02–79, e-mail: 2411dimareznik@gmail.com, ORCID ID: 0000–0003–1258–6136

Анотація. Постановка проблеми. Стаття присвячена питанню дослідження та організації мікроклімату в приміщеннях підземних споруд з високою вологістю і зниженою температурою внутрішнього повітря при переобладнанні вже існуючих підземних приміщень, в яких не передбачено умов для постійного перебування великої кількості людей у підземні Open Space приміщення для безпечної і безперебійної роботи людей. Окреслено процес формування тепловологісного режиму в приміщеннях, дані рекомендації з організації та проєктування систем вентиляції вологих приміщень із зниженою температурою внутрішнього повітря. **Мета статті** – дослідження впливу параметрів технологічних процесів, температури масиву ґрунту, контактуючої поверхні підземної будівлі, прийнятих умов параметрів повітрообміну та кількості людей на температурно-вологісний режим у приміщеннях підземного розташування. **Висновок.** Запропоновано підтримання мікрокліматичних показників на основі комбінованих системам притяжно-витяжної вентиляції з рекуперативними осушувачами повітря та можливістю температурного зонування простору з орієнтуванням на найбільше скупчення людей.

Ключові слова: мікрокліматичні показники; підземні споруди; тепловологісний режим; приміщення відкритого планування; комфортне середовище

RESEARCH OF MICROCLIMATIC INDICATORS OF OPEN SPACE TYPE OFFICE PREMISES UNDERGROUND

BUBON S. L.^{1*}, Postgrad. Stud.,

RYEZNIK D.V.², Ph.D., Assoc. Prof.

^{1*} Department of Environmental Protection Technologies and Labor Protection, Kyiv National University of Construction and Architecture, 31, Air Force Avenue, Kyiv, Ukraine, tel. +38 (044) 241–55–80, e-mail: bybon_cergey@ukr.net, ORCID ID: 0009–0009–6916–8374

² Department of Civil Security, Labor Protection, Geodesy and Land Management, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 20, Universytetska St., Kremenchuk, Ukraine, tel. +38 (097) 523–02–79, e-mail: 2411dimareznik@gmail.com, ORCID ID: 0000–0003–1258–6136

Abstract. Problem statement. The article is devoted to the issue of research and organization of microclimate in underground structures with high humidity and low internal air temperature during the conversion of existing underground premises of other technological purposes, in which conditions are not provided for the constant presence of a large number of people in underground Open Space premises for safe and uninterrupted work of people. Such premises are converted from existing underground structures of buildings. Currently, the issue of organization of microclimate in such premises is not sufficiently disclosed in regulatory and technical documents. The article describes the process of forming the thermal and humidity regime in underground premises, and develops recommendations for the organization and design of insulation, drying and ventilation systems for wet premises with low internal air temperature. **The purpose of the article** is to study the influence of technological process parameters, soil mass temperature, contacting surface of the underground building, accepted conditions of air exchange parameters and the number of people on the temperature and humidity regime in underground premises. **Conclusion.** Based on the experimental data obtained, it is proposed to implement combined supply and exhaust ventilation systems with recuperative air dehumidifiers and the possibility of temperature zoning of the space, focusing on the largest concentration of people, in underground Open Space premises

that have been converted from buildings for other purposes. This approach will provide comfortable microclimate parameters to maintain staff productivity.

Keywords: *microclimatic indicators; underground structures; heat-humidity regime; open-plan premises; comfortable environment*

Постановка проблеми. Зі значним розвитком підземних просторів все більше людей переносять свою роботу та життя в підземні простори, такі як підземні торгові центри, підземні кінотеатри, метро, шахти, підземні захисні споруди тощо [1]. У разі застосування зброї масового знищення ці споруди необхідно ізолювати та захистити. Закрите робоче середовище, висока температура, висока вологість та висока концентрація CO₂ негативно впливають на організм, викликають суб'єктивне сприйняття, психологічну та фізіологічну поведінку, що призводить до низки змін, спричиняє зміни у фізичних функціях та психологічні проблеми, що впливає на когнітивні функції та працездатність [2]. Робота в закритому середовищі робить людей схильними до депресії, сонливості, нудьги, втоми, головного болю та інших симптомів, що може легко призвести до значного зниження працездатності [3].

Аналіз публікацій. Дослідження теплового комфорту в підземному будівництві раніше були досить масштабними. Прийнятний діапазон температур демонстрував асиметричний розподіл відносно термічно нейтральної температури. В роботах використовували температуру ґрунту та відчутну теплоту свіжого повітря в різних регіонах як основу зонування та встановили чотири глибоко закопані теплові зони захисту: холодна, суха, волога та гаряча та волога зони.

Водночас, підземне теплове середовище має значний вплив на психологічний стан та ефективність праці персоналу [4]. Дослідження показало, що тривале перебування збільшує суб'єктивне сприйняття часу, погіршує зір та пам'ять, підвищує втому, знижує працездатність та захисні функції організму, а також виникають галюцинації.

Однак дослідження впливу теплового середовища підземних споруд на психологію

персоналу та ефективність праці є відносно обмеженими, для умов ізоляції підземних споруд дослідження впливу теплового комфорту персоналу та ефективності праці в основному не мають результатів. В умовах ізоляції внутрішнє середовище має високу температуру, високу вологість та високу концентрацію вуглекислого газу, особливо якщо температура навколишнього середовища продовжує зростати. Коли люди почуваються комфортно в цьому середовищі, їхня мотивація до навчання покращується, а також покращується продуктивність праці [5].

Завдяки вищезазначеним дослідженням було виявлено, що тепловий дискомфорт, спричинений перегрівом середовища, негативно впливає на психологію, фізіологію та працездатність людей [6].

Мета і задачі. Дослідження впливу параметрів технологічних процесів, температури масиву ґрунту, контактуючої поверхні підземної будівлі, прийнятих умов параметрів повітрообміну та кількості людей на температурно-вологісний режим у приміщеннях підземного розташування.

Викладення основного матеріалу. Незадовільний стан тепловологісного режиму, відсутність рекомендацій щодо проектування систем опалення та вентиляції підземних приміщень зі зниженою температурою внутрішнього повітря, переобладнаних в Open Space офісні приміщення та Co-working центри, вимагають проведення досліджень для створення необхідного і комфортного мікроклімату у цих приміщеннях для забезпечення якнайкращих умов перебування персоналу протягом робочого дня і підтримки продуктивності праці.

Дослідження параметрів мікроклімату підземних підвальних приміщеннях, які переобладнають під підземні офіси та центри, свідчать про вкрай незадовільний стан тепловологісного режиму у всіх цих

приміщеннях. Пояснюється це тим, що реалізовані раніше проєктні рішення приймалися та приймаються згідно з чинними нормативними документами для підземних чи підвальних приміщень, що пристосовані для технічних потреб і не передбачає постійної присутності людей. Це широко прийнятий підхід до забезпечення допустимих внутрішніх параметрів повітря в підземних приміщеннях, що функціонує без постійної присутності людей. Відносна вологість та швидкість руху повітряних мас повітря у таких приміщеннях за відсутності спеціальних вимог не нормуються.



Рис. 1 Загальний вигляд планування Open Space приміщень підземного розташування

Зазначені приміщення відносяться до приміщень зі зниженою внутрішньою температурою та підвищеною вологістю. Це є причиною конденсації вологи з внутрішнього повітря не тільки на внутрішніх поверхнях захисних конструкцій, але і в їх товщі, а також на зовнішній поверхні. При високій відносній вологості внутрішнього повітря (більше 75 %) та підвищеній вологості внутрішньої поверхні огорожувальних конструкцій дифузія водяної пари помітна навіть при малих значеннях парціального тиску повітря. Найінтенсивніший процес конденсації типовий для теплого періоду року, для якого характерно найбільш несприятливе поєднання температури та відносної вологості повітря. Все це зумовлено відносною герметичністю підземного приміщення та непристосованістю систем вентиляції та осушування повітря для умов перебування великої кількості людей протягом тривалого часу.

При організації прямої припливно-втяжної вентиляції, що найчастіше

застосовується у проєктних рішеннях, передбачено подачу в приміщення в теплий період року необробленого зовнішнього повітря з параметрами, при цьому спостерігається інтенсивне випадання конденсату на внутрішніх поверхнях захисних конструкцій навіть при інтенсивному русі повітря.

Для створення необхідних санітарно-гігієнічних умов у підземних приміщеннях, переобладнаних під Open Space офісні приміщення та Co-working центри необхідним є організація примусової припливно-втяжної загальнообмінної вентиляції з температурним регулюванням повітря або організована припливна та втяжна вентиляція з рециркуляційними осушувачами повітря, яка здатна забезпечувати параметри мікроклімату, необхідні для комфортного перебування людей протягом тривалого періоду.

Будівництво підземних, без надземної частини, споруд різного призначення активно розвивається останніми роками. У зв'язку зі специфічними умовами їх експлуатації виникла необхідність розробки адекватних та достовірних розрахункових методів та моделей, що відображають фактичні умови роботи підземної споруди, більш точних розрахунків температурно-вологісного режиму з метою створення необхідних умов для функціонування приміщення в якості коворкінг центрів та офісів.

Тепловологісний режим підземних споруд і приміщень без надземної частини обмеженої довжини недостатньо вивчений як згідно технологічного призначення, так і по конструктивно-планувальним рішенням, особливо при переобладнанні такого типу приміщень під об'єкти з постійним перебуванням людей. У нормативних документах та на підставі проведених досліджень зазначається, що у підземних приміщеннях теплообмін із навколишнім середовищем менш інтенсивний порівняно із частково заглибленими спорудами через низьку теплопровідність навколишнього ґрунту. Встановлено, що при підтримці температури повітря у приміщенні, що відрізняється від природної температури

грунту, навколо підземної споруди встановлюється зона її температурного впливу. При цьому недостатньою є кількість коректних даних із значеннями температур ґрунтів на різній глибині в залежності від їх видів та вологості протягом року, з урахуванням регіональних та територіальних особливостей. Неврахування цього фактору знижує достовірність розрахунків теплового режиму і не може бути визнана задовільною для створення необхідних умов мікроклімату для продуктивної роботи персоналу.

Для попередньої оцінки впливу температури ґрунту, що контактує із зовнішньою поверхнею підземної споруди, прийнято умову, що у приміщенні відсутнє надходження вологи від технологічного устаткування, та її наявність зумовлена теплопередачею випаровуванням присутнього персоналу та рослинності. Значення температури внутрішнього повітря в підземному приміщенні, що є умовно герметичною камерою, при розрахункових параметрах зовнішнього повітря в теплий період року встановлюється з рівняння теплового балансу:

$$Q_s = Q_l, \quad (1)$$

де Q_s – надходження теплоти до підземного приміщення (надлишкова теплота від примусової припливно-витяжної вентиляції, від технологічних процесів, надходження теплоти через покриття), Вт; Q_l – втрати теплоти з приміщення (втрати теплоти приміщенням в навколишній масив ґрунту), Вт.

Складемо рівняння теплового балансу для підземного приміщення відкритого планування:

$$Q_v + Q_e + Q_p = \frac{t_{in} - t_{gr}}{R_{ir} + R_{tc} + R_{gr}} \cdot L_r, \quad (2)$$

Q_v – теплонадходження у споруду з припливним повітрям під час роботи загальнообмінної вентиляції, Вт; Q_e – теплонадходження від технологічних процесів та обладнання (приймається за паспортами на обладнання та коефіцієнтом використання), Вт; Q_p – тепловиділення тіла людини, Вт., t_{in} – температура повітря

всередині, °С; t_{gr} – середня температура ґрунту протягом року на середній глибині закладення споруди, °С (температури ґрунту, що контактує із зовнішньою поверхнею огорож підземної споруди); R_{ir} – опір тепловіддачі внутрішньої поверхні стіни, приведений до 1 м довжини приміщення, (м °С) / Вт; R_{tc} – термічний опір огорожувальних конструкцій приміщення (м °С) / Вт; R_{gr} – термічний опір ґрунту, (м °С) / Вт; L_r – приведена довжина замкнутого контуру підземного приміщення, $L_r = L + 2H$, де L – найбільший розмір (довжина) приміщення, H – висота приміщення.

$$Q_v = 0,28 \cdot \rho \cdot V \cdot n \cdot (t_{in} - t_v), \quad (3)$$

ρ – густина повітря, $\rho = 1,2$ кг/м³; V – об'єм приміщення, м³; n – розрахункова (нормативна) кратність повітрообміну; t_{in}, t_v – відповідно температура внутрішнього повітря та припливного повітря в літній період, °С.

$$Q_p = (Q_{p_k} + Q_{p_r} + Q_{p_v}) \cdot N, \quad (4)$$

де Q_{p_k} – тепловиділення тіла людини за рахунок конвекції, Вт; Q_{p_r} – тепловиділення тіла людини за рахунок випромінювання, Вт; Q_{p_v} – тепловиділення тіла людини за рахунок випаровування, Вт; N – кількість людей у приміщенні.

$$R_{in} = \frac{1}{3,14 \cdot \alpha \cdot D_{in}}, \quad (5)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі від повітря до стіни приміщення, $\alpha = 7,0$ Вт/(м² °С);

$D_{in} = \frac{4 \cdot S_{in}}{P_{in}}$ – еквівалентний внутрішній діаметр поперечного перерізу приміщення; S_{in} – площа внутрішнього перерізу приміщення, м²; P_{in} – периметр внутрішнього перерізу приміщення, м.

$$R_{tc} = \frac{1}{3,14 \cdot \alpha \cdot \lambda} \ln \frac{D_{out}}{D_{in}}, \quad (6)$$

де λ коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки, Вт/(м °C); $D_{out} = \frac{4 \cdot S_{out}}{P_{out}}$ – еквівалентний внутрішній діаметр поперечного перерізу приміщення; S_{out} – площа внутрішнього перерізу приміщення, м²; P_{out} – периметр внутрішнього перерізу приміщення, м.

$$R_{gr} = \frac{1}{3,14 \cdot \alpha \cdot \lambda_{gr}} \ln \frac{4h_{gr}}{D_{out}}, \quad (7)$$

де λ_{gr} – коефіцієнт теплопровідності ґрунту, Вт/(м °C); h_{gr} – висота заглиблення у ґрунт, м.

Для оцінки впливу кількості працівників чи відвідувачів підземних Open Space приміщеннях та Co-working центрах на тепловологісні показники було проведено дослідження зміни температури і вологості на початку та в кінці робочого дня. При цьому вимірювання відбувалося у приміщенні, об'ємом 270 м², при одночасному перебуванні в ньому 40 осіб при низькому характері навантаження і рухливості, що характерно для працівників офісів. Датчики температури і вологості було розташовано в 4 точках зазначеного приміщення у геометричних центрах трикутників, утворених перетином діагоналей приміщення на висоті 1,5 м, що відповідає індивідуальній зоні комфорту працівників. Додатково було встановлено датчики у кутах кімнати для моніторингу тепловологісних показників в місцях найменшого перебування працівників.

За результатами поточного опитування працівників протягом дня, майже всі присутні відмітили некомфортні умови для перебування у приміщенні, важкість дихання і втому, а також неможливість концентрації уваги при виконанні звичайних оперативних завдань, що зумовлено підвищенням температури і вологості.

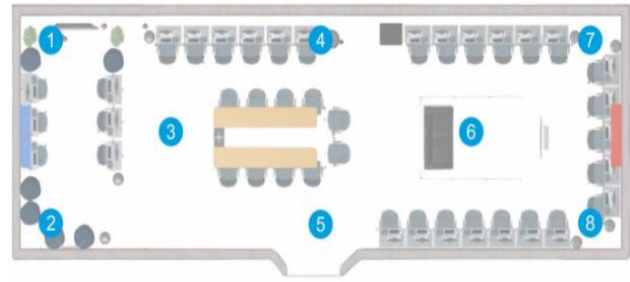


Рис. 2 Схема розташування датчиків для моніторингу тепловологісних характеристик приміщення типу Open Space

При проведенні дослідження вентиляційна приточно-витяжна вентиляція працювала з постійною швидкістю подачі повітря та постійною температурою.

Таблиця 1

Результати вимірювання температури протягом робочого дня

	Час	8.00	11.00	14.00	17.00
Датчик, t, °C					
1		18	21,5	22,5	25,5
2		19	21,5	23	24,5
3		20	21,5	22,5	25
4		20	22	24	26
5		19	21,5	22	24
6		19	20,5	22	24,5
7		18	21	22	25
8		18	21	23	24

Таблиця 2

Результати вимірювання вологості протягом робочого

	Час	8.00	11.00	14.00	17.00
Датчик, h, %		43	54	59	64
1		43	52	58	65
2		41	50	55	63
3		42	48	57	61
4		42	50	56	64
5		41	47	52	57
6		42	49	57	60
7		43	50	59	66
8		44	50	59	65

Таким чином, для найбільш ефективного управління тепловологісними показниками доцільно переобладнувати підземні приміщення з реалізацією комбінованих схем притяжно-витяжної вентиляції (рис 3.).



Рис. 3 Схема реалізації комбінованої притяжно-витяжної вентиляції для унормовування тепловологісних показників Open Space приміщень підземного розташування

Такий комплексний підхід сприятиме активному циркулюванню повітря та регуляції комфортних температурних і вологісних показників простору з урахуванням особливостей планування, заглиблення, типу ґрунту, пори року і наявної кількості людей у приміщенні.

Висновки

1. Дослідження теплового комфорту підземних приміщень має вирішальне значення для контролю внутрішнього мікроклімату та середовища будівлі. Такий аналіз є особливо актуальним при визначенні стратегій переобладнання вже існуючих

підвальних приміщень та підземних приміщень іншого технологічного призначення, в яких не передбачено умов для постійного перебування великої кількості людей, у підземному Open Space приміщенні для безпечної і безперебійної роботи людей в умовах прифронтових територій і загроз обстрілів.

2. Експериментальні дані підтверджують припущення щодо визначення параметрів впливу технологічних процесів, температури масиву ґрунту, контактуючої поверхні підземної будівлі, прийнятих умов параметрів повітрообміну та кількості людей на температурно-вологісний режим у приміщеннях підземного розташування.

3. Для досягнення комфортних і безпечних мікрокліматичних показників доцільно додатково обладнати зазначені приміщення комбінованими системами притяжно-витяжної вентиляції з рекуперативними осушувачами повітря та можливістю температурного зонування простору.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- ДБН В.2.2–5:2023. Захисні споруди цивільного захисту. Київ: Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України, 2023. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=104666 (Державні будівельні норми України).
- Xian Dong, Yeyu Wu, Zhijun Tu, Bin Cao, Xianting Li, Zixu Yang, Fei Liu, Zheli Xing Influence of ambient temperature on personnel thermal comfort and working efficiency under isolation condition of underground engineering. *Energy and Buildings*. 2022. Vol. 274. Pp. 112438. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112438>
- Fang L., Wyon David, Clausen Geo & Fanger P. Impact of indoor air temperature and humidity in an office on perceived air quality. *SBS symptoms and performance. Indoor air*. 2004. 14 Suppl 7. Pp. 74–81. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00276.x>
- Yong Li, Shibin Geng, Xiaosong Zhang, Hua Zhang. Study of thermal comfort in underground construction based on field measurements and questionnaires in China. *Building and Environment*. 2017. Vol. 116. Pp. 45–54. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.003>
- Bo Lan, Zhun (Jerry) Yu, Gongsheng Huang. Study on the impacts of occupant distribution on the thermal environment of tall and large public spaces. *Building and Environment*. 2022. Vol. 218. P. 109134. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109134>
- Xiaofang Shan, Na Luo, Kaiyu Sun, Tianzhen Hong, Yi-Kuen Lee, Wei-Zhen Lu. Coupling CFD and building energy modelling to optimize the operation of a large open office space for occupant comfort. *Sustainable Cities and Society*. 2020. Vol. 60. P. 102257. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102257>

REFERENCES

- DBN V.2.2–5:2023. *Zakhysni sporudy tsyvil'noho zakhystu* [DBNB.2.2–5:2023. Protective structures of civil defense]. Kyiv : Ministry of Community Development, Territories and Infrastructure of Ukraine, 2023. (State Building Standards of Ukraine). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=104666 (in Ukrainian).

2. Xian Dong, Yeyu Wu, Zhijun Tu, Bin Cao, Xianting Li, Zixu Yang, Fei Liu and Zheli Xing. Influence of ambient temperature on personnel thermal comfort and working efficiency under isolation condition of underground engineering. *Energy and Buildings*. 2022. Vol. 274. P. 112438. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112438>
3. Fang L., Wyon David, Clausen Geo & Fanger P. Impact of indoor air temperature and humidity in an office on perceived air quality. SBS symptoms and performance. *Indoor Air*. 2004, 14 Suppl 7. Pp. 74–81. URL: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00276.x>
4. Yong Li, Shibin Geng, Xiaosong Zhang, Hua Zhang. Study of thermal comfort in underground construction based on field measurements and questionnaires in China. *Building and Environment*. 2017. Vol. 116. Pp. 45–54. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.003>
5. Bo Lan, Zhun (Jerry) Yu, Gongsheng Huang. Study on the impacts of occupant distribution on the thermal environment of tall and large public spaces. *Building and Environment*. 2022. Vol. 218. P. 109134. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109134>
6. Xiaofang Shan, Na Luo, Kaiyu Sun, Tianzhen Hong, Yi-Kuen Lee, Wei-Zhen Lu. Coupling CFD and building energy modelling to optimize the operation of a large open office space for occupant comfort. *Sustainable Cities and Society*. 2020. Vol. 60. P. 102257. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102257>

Надійшла до редакції: 12.08.2025.

УДК 711.11

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.45.1190

АРХІТЕКТУРНО-МІСТОБУДІВНИ АСПЕКТИ МОДЕЛЕЙ СІМЕЙ МАЙБУТНЬОГО ЯК ФАКТОРИ ТРАНСФОРМАЦІЇ СЕЛІТЕБНИХ ТЕРИТОРІЙ

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

^{1*} Кафедра архітектурного проектування 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 проектування 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. В історії людської цивілізації одним із головних факторів, що впливали на шляху трансформації селітебних територій будь-якого міста, була модель сім'ї. Її потреби та можливості у питанні забезпечення себе житлом залежали і від багатьох інших факторів: економічних, соціально-демографічних, політичних, технологічних, культурологічних, релігійних, природно-кліматичних, морально-етичних, військових, інших. Рефлексії моделей сім'ї включали моделі внутрішньосімейних відносин та зовнішньосоціальних проявів, чим впливали на виникнення нових типів житлових будинків, трансформацію колишніх типів будинків, правила їх розміщення у планувальній структурі генерального плану міста, а також на архітектурний вигляд житлової забудови загалом. У зв'язку з постійними змінами соціальних процесів, природно-кліматичних та інших факторів, умов життя перманентно вели до нових і нових переглядів архітектурно-містобудівних якостей антропогенних просторів для життя населення будь-якого міста. Цей процес не припинявся ніколи. Більше того, він послідовно прискорювався відповідно до циклів укладів життя та особливостей впливу на людей низки астропланетарних проекцій. У XX–XXI столітті обсяг інформації, отриманої внаслідок діяльності людей, багаторазово перевищив знання, накопичені за майже тисячу попередніх років. Реакція населення все це призвела до необхідності частого перегляду моделей сім'ї та моделей призначеного їм життєвого простору, включаючи житлові будинки. Якщо минулі століття процес змін йшов повільно і соціум встигав щодо нього адаптуватися, нині він відстає. У своєму відставанні соціум стихійно шукає нові, адекватні обставинам місця і часу, моделі сім'ї, але не все йде у цьому питанні гладко. Настав час дослідити новий етап життя системи «трансформація сім'ї – трансформація її житла – трансформація селітебної території міста», які продовжують відчувати все більші та більші прискорення. **Мета статті** – розкрити архітектурно-містобудівні аспекти моделей сімей майбутнього як фактори трансформації селітебної території міста.

Ключові слова: модель сім'ї; трансформація житла; трансформація селітебної території; типологія будівель; майбутнє

ARCHITECTURAL AND URBAN PLANNING ASPECTS OF FUTURE FAMILY MODELS AS FACTORS OF THE TRANSFORMATION OF RESIDENTIAL AREAS

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. In the history of human civilization, one of the main factors influencing the transformation of residential areas of any city was the family model. Its needs and capabilities in the matter of providing itself with housing depended on many other factors: economic, socio-demographic, political, technological, cultural,

religious, natural and climatic, moral and ethical, military, and others. Reflections on family models included models of intra-family relationships and external social manifestations, which influenced the emergence of new types of residential buildings, the transformation of previous types of buildings, the rules for their placement in the planning structure of the city's general plan, as well as the architectural appearance of residential development as a whole. Due to constant changes in social processes, natural and climatic and other factors, living conditions permanently led to new and new revisions of the architectural and urban planning qualities of anthropogenic spaces for the life of the population of any city. This process never stopped. Moreover, it was consistently accelerated in accordance with the cycles of life styles and the peculiarities of the influence of a number of astroplanetary projections on people. In the 20th-21st centuries, the volume of information obtained as a result of human activity has many times exceeded the knowledge accumulated over almost a thousand previous years. The population's reaction to all this has led to the need for frequent revision of family models and models of living space intended for them, including residential buildings. If in past centuries the process of change was slow and society managed to adapt to it, now it is lagging behind. In its backwardness, society spontaneously searches for new models of family that are adequate to the circumstances of place and time, but not everything goes smoothly in this matter. It is time to explore a new stage in the life of the system "transformation of the family – transformation of its home – transformation of the residential area of the city", which continues to experience greater and greater acceleration. **The aim of the article** – to reveal the architectural and urban planning aspects of models of families of the future as factors in the transformation of the city's residential area.

Keywords: family model; housing transformation; residential area transformation; building typology; future

*«Сім'я – це царство батька, світ матері та рай для дитини».
«Сім'я – це найтепліше місце на Землі».
«Дитина народжує батьків»
«Головне і найкраще в житті – це сім'я. Кар'єра – не чекає на тебе вдома, гроші не витруть сльози, а слава не обійме вночі».
«У кого немає будинку всередині, ті не можуть знайти його у зовнішньому світі»*

Постановка проблеми. Трансформації характеристик населення найбільших міст завжди визначали історичні уявлення про його запиту та шляхи їх реалізації при розробці номенклатури та фізичних параметрів житлових квартир, індивідуальних та багатоквартирних будинків та способів їх локації на місцевості. А також рішення супутніх інфраструктурних об'єктів та споруд. Що й визначало якісні та характеристики селітебних територій загалом [14].

Базовий компонент соціального аспекту селітебних територій найбільшого міста – модель сім'ї. Сім'я в історії людства зазнавала численних трансформацій. Цей процес продовжується. Особливо зараз, коли накопичення інформації у всіх сферах буття швидко росте за графіком гіперкомплексних систем, тобто від однієї кривої геометричної прогресії до іншої через точки розривів та якісних стрибків. Зараз відбувається черговий такий стрибок. Він підштовхує до необхідності нового переосмислення системи «модель сім'ї – модель її житла».

Мета дослідження – розглянути архітектурно-містобудівні аспекти нових моделей сім'ї майбутнього як один із факторів, що визначають шляхи подальшої трансформації селітебної території міста.

Аналіз публікацій. Західний світ зараз відчуває, за Елвіну Тоффлеру, «шок майбутнього» [16]. Який змушує заново переглянути поняття «родина», «місто» та «система розселення». «Шок майбутнього» трансформує розуміння суті та структури сім'ї в таких напрямках, яких у минулі часи не існувало. При цьому виникають інші системи вимог до структури житлових квартир та житлових будинків, які потрібно будувати у майбутньому. А також підходи до моделей реконструкції житлового фонду у будинках, збудованих у попередніх періодах життя міста.

Західноєвропейська цивілізація виходить з того, що в містах, у процесі трансформації селітебних територій потрібно створювати стільки типів квартир і будинків, скільки видів сімей виникло і розширюється країнами Євросоюзу, а також Америки.

Строго кажучи, моделі сім'ї у різних народів змінювалися протягом усієї історії людства. XXI століття виявилось століттям, у якому зміни вперше досягли такої кількості варіантів, якої ніде і ніколи раніше не спостерігалось. З цього погляду структурування сельбищної території найбільших міст і Миру, і міста Дніпро, опинилися перед «шоком нових архітектурних та містобудівних трансформацій», дослідження яких потрібно форсовано розширювати.

Питання про відсоткове співвідношення груп населення – прихильників сімей тієї чи іншої моделі, що відрізняється по європейських країнах, теж змінюється.

У контексті сказаного західні архітектори розпочали моделювання нових функціонально-планувальних та об'ємно-просторових рішень житла для кожної моделі сім'ї майбутнього. І як наступний етап – до моделювання сельбищної території на основі таких принципів, які забезпечать задоволення запитів сімей різних моделей. Аж до появи зовсім інших містобудівних структурно-планувальних фармацій: не житлової групи, мікрорайону та житлового району, а чогось іншого.

Це відбувається у зв'язку з тим, що нові моделі сімей формуються на основі своїх, заснованих на новітніх досягненнях науки та техніки, способів життя. У складі способу життя – нові моделі трудової зайнятості, відпочинку, кількості дітей, та всього іншого, що входить до уявлення про заповнення часу сім'ї у структурі доби, тижня, місяця, року та багаторічних циклів, які теж багато що в сім'ї трансформують. Наприклад, ритми зміни потреб у залежності від вікової групи, ритми зміни трудових навантажень, ритми зміни процесів виховання дітей та інші ритми. Тому спосіб життя однієї моделі сім'ї не підходить для способу життя іншої моделі сім'ї. Уклад життя визначає потребу в числі приміщень для сім'ї, їх площу, обладнання, правила взаєморозташування кімнат по відношенню один до одного, розташування на географічній місцевості, розташування по

поверхах та інші архітектурно-містобудівні особливості.

Трансформації сім'ї на доступну для огляду перспективу в сучасній Західній Культурі бачиться в діапазоні від повного зникнення, до зовсім несподіваних варіантів.

Коротко список моделей сімей у розумінні західноєвропейської соціології та культури і виглядає так [9; 12].

1. «Зникла сім'я»; вона тримається перший рік або два після народження дитини, а потім розпадається. За дослідженнями Фердинанда Ландберга та Вільяма Вулфа, які вивчали цей тип сімей, такою буде її єдина функція надалі.

2. Прямо протилежна модель: сім'я з гіперглибоким зануренням у свою самість. Ірвін М. Грінберг, професор психіатрії Медичного коледжу Альберта Ейнштейна, стверджує: «Люди будуть одружуватися, щоб увійти до стійкої структури». Сім'я в цій моделі служитиме людині «компактною кореневою системою», що страхує його в бурях змін. Вона вимагатиме такого функціонально-планувального наповнення квартир у багатоповерхових житлових будинках або в котеджах, яка включитиме у себе велику кількість нових функціональних типів кімнат та нові планувальні взаємозв'язки між ними, що переводить житло в абсолютно автономний комплекс, що майже не залежить від зовнішнього оточення. Такі квартири можуть тепер змінитись і з погляду назви: не квартира, і не будинок, а щось інше, у складі якого і високотехнологічні агроферми – автомати, що включають: смарт-виробництво молекулярної їжі, обсяг якої такий мініатюрний, що для забезпечення харчуванням усієї сім'ї на рік потрібно лише кілька невеликих коробок такої їжі; приміщення для різних спеціалізованих занять та роботи – на видаленні, чи іншій; приміщення для самовідновлення організму та багато інших.

Велика кількість моделей сім'ї – між цими базовими варіантами. В основі моделей – і нові технології народження, і нові технології життя загалом.

Окремо стоять спроби знайти такі рішення планувальних та конструктивних схем будинків при трансформації селітебних територій найбільших міст у найближчому майбутньому, в основі яких – кінематичні підходи до планів поверхів і фасадів будинків, а також до будинків в цілому, що дозволяють змінювати все у зв'язку з можливими змінами моделей сімей.

Поки що західноєвропейські вчені не готові однозначно відповісти на питання про шляхи трансформації моделей сім'ї. Але однозначно стверджують: нові моделі сім'ї вже є, вони збільшуються чисельно, вони перетворюються на нову культуру людської цивілізації. Вони вже змінюють соціологію найбільших міст і впливають за потреби у житлі нових типів.

Щодо традиційної сім'ї вони стверджують, що сім'я може і не зникнути, і не увійти до нового золотого віку. Найімовірніше, що вона розіб'ється вщент, але лише для того, щоб потім прийняти новий і дивний вигляд. Такою є думка на Заході. Це вносить сум'яття і в голови архітекторів: як же моделювати шляхи трансформації планувальної структури селітебних територій?

Узагальним погляди на сім'ю в найближчому майбутньому. Саме вони ведуть до переосмислення структури житлових будинків та житлової забудови загалом.

Один з моментів соціуму найбільшого міста-нова технологія дітонародження. Приходить час, коли заздалегідь можна вибрати стать немовляти або навіть запрограмувати його IQ, зумовити його зовнішній вигляд і риси особистості. Імплантація ембріонів, вирощування немовлят «в пробірці», можливість прийняти пігулку і тим самим забезпечити собі народження двійні або трійні – і більше того, можливість піти в «ембріобанк» і просто придбати ембріони, – все це йде далеко за межі будь-якого людського досвіду. Подібна ситуація створює багато запитань. Наприклад, що станеться з культом материнства, якщо «дитина в буквальному значенні не буде потомством жінки, а

виросе з генетично «видатної» яйцеклітини, перенесеної в її матку від іншої жінки чи навіть із чашки Петрі?». Наближається кінець містичного ставлення до материнства.

Кого треба вважати батьком за таких обставин? Коли жінка виношує дитину, зачату в матці іншої жінки, хто її справжня мати? І так само – хто батько? Коли подружні пари справді зможуть купувати ембріони, статус батьків стане поняттям юридичним, а чи не біологічним. Можна уявити гротескну ситуацію: якась пара купує ембріон, вирощує його «ін вітро», а потім купує другий ембріон – від імені першого, як його довірені особи. Юридично ця пара може стати «дідом і бабкою», коли перша дитина ще ходитиме в коротких штанцях. Нам буде потрібна нова термінологія для позначення таких родинних зв'язків.

Всі ці питання, з одного боку, ведуть до пошуків моделей нових сімей, а з іншого – до пошуків моделей функціонально-планувального рішення для них житлових будинків. І все це – як наслідок розвитку постіндустріального суспільства.

За таких обставин виникнення нових форм сім'ї, на думку західних дослідників, об'єктивно неминуче.

У процесах такого роду головним стає не скільки осілість сім'ї, скільки її мобільність. Стандартна сім'я зменшується за складом. Це стало «стандартом» для Євросоюзу. Розширена сім'я з великою кількістю дітей та з батьками батьків зникає. Їй на зміну приходить нуклеарна сім'я – компактна, що складається лише з батьків та малої кількості дітей.

При цьому змінюються вимоги до складу та площі приміщень у житлових будинках. І не лише. Відпадає потреба мати приватну квартиру та приватний котедж. Причина явища – суперіндустріалізація. Вона штовхає до ще більшої мобільності сімей. Вони не затримуються на одному місці, а мігрують за траєкторіями міграції фінансових потоків у країнах і регіонах. Що зараз вже існує.

Рішення квартир і будинків для населення, що тимчасово живе в них, – принципово нове трактування підходів до таких об'єктів. У «тимчасових» мешканців

складається зовсім інша модель потреби у приміщеннях. Вони вже не стурбовані великою кількістю речей, меблів та багато іншого.

Вони хочуть мати приміщення зручними і великими. Але з іншими інтер'єрами та з іншим обладнанням. Поняття «приватизована квартира» починає старіти. Знімні квартири для «тимчасових» стають домінуючими в Німеччині та інших європейських країнах.

Парадокс ситуації і в тому, що виховувати дітей будуть лише нечисленні сім'ї. Решта, згідно з дослідженнями антрополога Маргарет Мід, вперше в історії діятимуть поодиночки.

Структура житлового фонду у разі отримає зміни, у складі яких багато традиційних сімейних функцій та пов'язаних із нею приміщень (дитячих кімнат та інших) відпаде.

Виникає й така проблема: якщо дітей у найближчому майбутньому у найбільших містах виховуватиме лише мала частина сімей, то це призведе до передачі функції догляду за дітьми «професійним батькам» – новій формі спеціалізації в суспільстві.

Вже зараз в Україні існують особливі сім'ї, у яких виховується багато чужих прийомних дітей. Їм даються для життя великі багатокімнатні квартири чи великі котеджі. Щось подібне вже є і в Західній Європі.

Припускається, що у селитебній території міста такі види сімей можна селити у деяких спеціальних житлових комплексах. З дещо зміненими формами обслуговування щодо обслуговування стандартного типу. У таких будинках дитсадки можуть бути у вигляді окремих поверхів, спортивні комплекси – у вигляді окремих зон у структурі будинку, навчальні приміщення – також в окремих місцях будівлі тощо.

У Західній Європі набирає ваги також і групова родина. Експерименти з груповими шлюбами великі. Декілька дорослих і дітей створюють єдину сім'ю як страховку від самотності. Такі сім'ї називають корпоративними сім'ями. Це сім'ї – комуни. У таких сім'ях 3–6 дорослих приймають

спільне прізвище, живуть спільно, виховують разом. Такі групові шлюби починають закріплюватися законодавчо. Наприклад, у Данії [9].

Різновидом групової сім'ї є «сімейне чернецтво». Його утворюють релігійні люди, які живуть у спільних квартирах. Вони спільно готують та їдять, разом моляться та виховують дітей, об'єднують свої доходи.

Архітектурно-містобудівні аспекти таких сімей виводять на різні моделі формування селитебних територій. Потрібні будуть будинки з великою кількістю кімнат у квартирах, з особливою моделлю їх планувань. Наприклад, з великим громадським простором (залом) у центрі та периметральним розміщенням кімнат. А також із виділенням схожих планувальних елементів, але з іншими функціями.

На Заході вважають, що при трансформації селитебних територій найбільших міст будуть потрібні спеціальні типи квартир для «старечих комун», у вигляді групового шлюбу людей похилого віку, які об'єдналися для спілкування та взаємної підтримки.

Такі люди вже не пов'язані з трудовими переїздами слідом за фінансовими ареалами, що змінюють локацію. Вони тепер осілі. І потребують спеціального догляду. Їх квартири будуть являти собою структури, в яких крім приміщень для людей похилого віку будуть вбудовані мініквартири для обслуговуючого персоналу, а також ряд інших супутніх приміщень, необхідних людям похилого віку.

Ця модель сімей має багато супутніх аспектів. Головний із них – старіння європейських країн. Пенсіонерів та працюючих майже порівну. Чужоземці заповнюють місця, що вийшли на пенсію. Титульні нації країн Європи розчиняються в генетиці емігрантів, які вирішили осісти в новій країні. Можливо, окремі старіючі нації, таким чином, зникнуть.

Представники інших народів починають сильно впливати на вимоги організації забудови на основі своїх національних традицій та культурологічних поглядів. Це створює строкатість архітектурних рішень та

дещо незвичні варіанти заповнення простору житловими будинками.

Наступна модель сім'ї в Західній Європі, що впливає на архітектуру житлових будівель - модель, в якій є один дорослий і один або кілька дітей. Не всі дорослі – жінки. Часто на їхньому місці виявляються чоловіки, які стають прийомними батьками.

Гомосексуальні сім'ї, які законодавчо визнані в деяких країнах Західної Європи, тепер розглядаються як «батьківські» пари.

І ще один варіант сімей – полігамні сім'ї. А також – зведені сім'ї [12]. Про нові підходи до сім'ї вказується у роботі.

Резюмуючи сказане, можна стверджувати, що на ухвалення рішення з архітектурно-містобудівних аспектів трансформації селитебних територій найбільших міст впливають нові моделі сімей, між якими існують різні пропорції в тих чи інших країнах, різні ареали їхнього поширення, різні вимоги до фізичної організації житлового простору як на рівні будинку, так і на рівні локацій у структурі селищних територій.

Бездітні шлюби, професійне батьківство, пенсіонери, які виховують дітей, корпоративні сім'ї, комуни, гомосексуальні сімейні спілки, полігамія, інші форми сучасних сімей продовжуватимуть експериментувати своє життя у найближчі десятиліття. Тобто в період, на який традиційно проводяться дослідження в архітектурі та містобудуванні.

Якими б не були в найближчому майбутньому моделі сімей, що виникають у Західній Європі, США та деяких інших прозахідних країнах, експерти вважають, що факт виникнення тієї чи іншої моделі сім'ї пов'язаний із явищем, яке названо «траєкторією сімейних відносин». Траєкторії будуть в оцінці соціуму найбільшого міста головними. Йдеться про те, що коли серійні шлюби стануть більш звичайними, людей почнуть характеризувати не за сімейним статусом на даний момент, а за їхньою сімейною траєкторією. Вона формуватиметься рішеннями, прийнятими людиною деякі життєво важливі поворотні моменти. Більшість людей перший такий

поворот створюють в юності, при вступі в так званий «пробний шлюб».

Літературні джерела вказують на те, що знайдуться пари, яким вдасться зберегти єдиний шлюб щасливим на все життя. Тоді як у інших цього не вийде. Спостереження за шлюбами різних видів призводить до висновків: навіть послідовні шлюби не можуть бути тривалими. Це і є наслідки суспільства споживання.

Тому хтось спробує на останньому етапі життя створити сім'ю одразу з двома чи трьома партнерами чи партнерками. Власне кажучи, в історії таке теж було і є. Наприклад, у Тибеті, а також у мусульманському світі та в інших ареалах планети. Причому, у випадках: в одного чоловіка багато дружин та наложниць; у однієї дружини – кілька чоловіків; у чоловіків і дружин кожен рік має бути новий одружений партнер; є також і інші моделі шлюбу.

У тому числі – ситуації без партнера – за рахунок використання для створення потомства механізму партеногенезу (зачаття на основі тільки енергетичного впливу на жіночий організм, що викликає процес розподілу яйцеклітини; при цьому народжувалися тільки дівчатка; це колись використовувалося в суспільстві амазонок – жінок-воїнів, що жили на півдні України. Або в інших суспільствах, інших регіонах планети).

Стверджується, що переважна більшість людей йде шляхом зміни шлюбів. Тимчасові шлюби в соціумі найбільших міст та за їх межами стануть «нормою» сімейного життя, його стандартом. Складаються різноманітні шлюбні траєкторії, за якими і оцінюватиму людину.

У результаті резюмуємо: світ, в якому шлюб є явище тимчасове, часто змінюється, світ, в якому сімейні відносини часто дуже різноманітні, екзотичні, світ, в якому гомосексуальні пари можуть бути прийомними батьками, а пенсіонери будуть рости немовлят, – такий світ різко відрізняється від нашого. Сьогодні вважається, що всі діти знайдуть собі подружжя на все життя. У світі, що охоплює

майбутні десятиліття, самотність перестане вважатися не нормальною. У деяких публікаціях стверджується, що функція партнера у них буде покладена на досягнення науково-технічного прогресу у сфері задоволення інтимних потреб. Наприклад, вже сьогодні в Японії існують офіційні шлюби з «ляльками для дорослих», зовнішній вигляд яких ідеально відповідає вигляду живої людини. З повною фізичною імітацією всього «особистого».

У Західній цивілізації у найбільших містах також з'являються синглети – люди, яким не потрібні ні жива пара, ні живі діти. Розвинена робототехніка дозволить їм задовольняти будь-які потреби, включаючи дружні та сексуальні, ніколи не виходячи з дому. Або ж, навпаки, такий синглет захоче зіграти в нуклеарну сім'ю, одружившись із роботом та завівши робота-дитину – стверджується в літературних джерелах.

Всі ці види шлюбів можуть нескінченно перетинатися і нашаруватись один на одного. І їх можна підвести під загальне визначення «вільний шлюб». Але вільний шлюб не є калейдоскопічним шлюбом. У ньому закладена теоретично необмежена можливість зміни шлюбного партнера, але не обов'язкова.

У публікаціях стверджується: у постіндустріальному суспільстві (часи постіндустріалізації йдуть) діти зростатимуть у колі дітлахів, які можна назвати «напівсестрами-та-братами», усередині клану дітей, народжених батьками від різних шлюбів. Це стане звичайним явищем у таких «агрегатних» сім'ях.

Між «напівродичами» почнуть виникати принципово нові відносини, які не мали місце у минулих епохах. У тому числі – у питаннях укладання шлюбів між собою.

Найважливішим показником життя нових форм сім'ї, як зазначає Берніс Нойгартен (Університет Чикаго), буде показник постійного прискорення ритму подій.

Розроблено моделі графіків таких прискорень для кожної моделі сім'ї. Вони вже є актуальними для населення західноєвропейської цивілізації.

Таким чином, стійкий, на все життя сімейний шлюб, на думку західних фахівців з питань трансформації соціуму найбільших міст, переходить на рейки швидкоплинності. Йому на зміну приходить серійний шлюб – тимчасовий союз. Всі взаємини людей та зв'язки із зовнішнім середовищем стають не тривалими.

Він – породження того соціального устрою суспільства споживання в Європі, в якому все, що потрібне для життя, беруть напрокат, одяг одягають лише один раз, покупки чергуються одна за одною... Європейські колеги вважають, що це – головна модель шлюбу найближчого майбутнього.

У західних публікаціях стверджується, що серійний шлюб вже став секретом високорозвинених країн, що ретельно охороняється. Він поширений у всіх ешелонах влади та інших верствах суспільства.

Індустріальна епоха запровадила прискорення ритму життя, вкоротила сімейний цикл. ПОСТІНДУСТРІАЛЬНЕ ТОВАРИСТВО у найбільших містах Європи веде до повної ліквідації шлюбу. (Щось подібне намагалися зробити після 1917 року на території більшовицької Росії, а потім, в епоху влади Гітлера – у Німеччині. А також в інших регіонах планети).

Зараз цей момент бачиться дослідникам так: «мати» відмовляється від процесу дітонародження і зводить свою роль до короткого візиту до магазину, який торгує ембріонами, коли пересадка ембріонів з матки в матку знищить саму ідею виношування плода протягом дев'яти місяців, а малюк, народжений на світ, почне жити в аритмічному світі, а пізніше він матиме право вибрати ту чи іншу модель свого майбутнього, і це призведе до ще однієї психологічної проблеми: людям не дано буде зберегти минуле. МІСЬКИЙ СОЦІУМ НАЙБІЛЬШИХ МІСТ ЗАХІДНОЇ ЦИВІЛІЗАЦІЇ НАЙБЛИЖЧОГО МАЙБУТНЬОГО ПЕРЕСТАНЕТ РОЗУМІТИ НЕОБХІДНІСТЬ ЗБЕРІГАННЯ АРХІТЕКТУРНО-МІСТОБУДІВЕЛЬНОЇ СПАДЩИНИ. ЛЮДИ БУДУТЬ ЖИТИ В

ПОСТІЙНИХ ЗМІНАХ НОВАЦІЙ СВІТУ, ЖИТИ НА ВИСОКИХ ШВИДКОСТЯХ!!!

Це означає, що потреба в містах із квартальною забудовою, забудовою мікрорайонами та житловими районами відпаде вперше в історії містобудування.

Виникає нова проблема: перманентні, ламінарні та турбулентні дифузії подій та явищ майбутнього людства ніколи не створять передумов для появи сталої теорії трансформації об'єктів архітектури та містобудування у містах доступного для огляду майбутнього. Стійка теорія розвитку міст може бути створена лише для ситуацій, у яких не активовано часті зміни. Але вони є. І жодна теорія за ними не викрадеться. Крім того, вона спочатку буде абсурдна та безглузда. Це означає, що настав час переходу мислення людей на принципово нові моделі розуміння життя та матеріального середовища.

Відсутність повторів автоматично формує БАГАТООБРАЗІЕ ПОСТІЙНО ТРАНСФОРМУЮЧИХ АРХІТЕКТУРНО-МІСТОБУДІВНИХ КОНЦЕПЦІЙ ЗАБУДОВИ СЕЛЬБИЩНИХ (СЕЛІТЕБНИХ) ТЕРИТОРІЙ МАЙБУТНЬОГО [20; 22].

Як все це вплине на трансформацію уявлень про архітектуру житлових будинків та селітебних територій найбільших міст загалом? Вплине новими метаморфозами у містобудівній парадигмі тієї чи іншої держави. Постійно змінюється технологічні, економічні, політичні, культурологічні та багато інших сучасних парадигм організації найбільшого міста. Причому частота їхньої зміни починає прив'язуватися до графіка геометричної прогресії. Тобто умовний консерватизм міської забудови (нечаста імплантація в неї нових будівель і рідкісні роботи по реконструкції будинків) потроху починають замінюватися динамічним містом, що швидко змінюється, у просторі якого формуються принципово нові закони планувального та тривимірного формоутворення будівель та забудови з них. Закони, яких раніше людська цивілізація ще не бачила. Вони виникають на тлі ще одного процесу, що швидко протікає — стрімкої

зміни клімату на планеті, його аридизації. Він стає дедалі спекотнішим.

Але в теорії створення антропогенних ландшафтів сельбищної та інших територій міст це не враховують. Продовжують проектувати системи, не адекватні змінам [8; 21].

Усі трансформації у сфері родини та соціальної сфері, які тривають нині, протягом ХХІ століття, проведуть землян через нові моделі суспільства. Як вважають західні експерти, кінець ХХ століття покаже готовність переходу людства до безкласового суспільства, для якого будуть потрібні принципово інші підходи до містобудування. Які були футурологічними.

Якщо у другій половині ХХ століття футурологія була областю інтуїтивних осяянь і передчуттів, то у ХХІ столітті вона вже змогла створити надійний математичний апарат та стати нарешті наукою. Її розробки регулярно кладуться на стіл президентів великих держав світу. Значна частина прогнозів залишається тасманою.

У глибинах минулого прогнози про майбутнє робили особливі люди: ясновидці, астрологи, святі різних релігій. В окремих випадках їх бачення вражають і сьогодні своєю точністю. Але зараз прогностика стала математичною наукою, що базується на циклах фізичного світу, а також на відкриттях у галузі квантової фізики та інших областях. Президенти і прем'єр-міністри високорозвинених країн тепер мають засекречених експертів з питань, які обчислюють наслідки прийняття рішень перших осіб своєї країни для миру та для цієї держави.

Фактором трансформації підходів до архітектурно-містобудівного перетворення сельбищних територій найбільших міста відноситься також явище зміни потреб до середовища, що виникає у людей, що належать до різних поколінь. У науковій літературі їх назвали поколіннями Х, Y, Z та А (альфа). Генетично їх виникнення пов'язане із впливом космічних факторів. Вони створюють родини зовсім іншого типу. І це теж треба досліджувати.

У спеціальній літературі є опис більш глибоких процесів диференціації населення міст з позиції астропланетарних впливів. Він включає врахування змін характеристик щільності фізичних тіл людей. Ці показники ведуть до розущільнення тканин і виникнення в них багатодіапазонних сприйняття світу в більш високих частотах по відношенню до тих, хто народжений раніше. Замість п'яти органів чуття у нових людях прокидаються додаткові органи, і з кожним поколінням їх стає дедалі більше. Вже є люди, які мають 15 та 20 органів чуття. Це означає, що планета заселяється іншим людством. І міста колишнього людства для них не будуть потрібні [7]. Їх нові родини будуть дивовижними.

Генезис появи незвичайних поколінь пов'язані з тим, що Сонячна система у процесі свого руху на галактичному рукаві Оріона–Лебедя робить перехід у нові космічні сектори, частотні діапазони випромінювань космосу у яких різко інші стосовно колишніх секторів галактики. Нові частоти змушують інакше реагувати на них генетику людини та її польову структуру. Змінюються діапазони комфортності людини. У тому числі – комфортності у просторах селітебної зони міста. Що автоматично змінює рефлексії кожного з новонароджених поколінь на геометричні абрис, розміри, орієнтацію у просторі, симетрію та асиметрію цих форм, розмірності та геометричні абрис просторів між геометричними формами будівель, колористичний режим середовища, крупність і малорозмірність геометричних форм – і будівель, і просторів між ними, психоемоційні реакції на нові форми у людей, приховані постійні мікромоторні реакції на геометричні форми будівель в опорно-руховому апараті людини, потреби у функціональному заповненні геометричних форм будівель в залежності від цілого ряду частот випромінювань, що виникають тепер у нових діапазонах усередині селітебної зони, інші. Місто повинне бути адекватним цим процесам.

Строго кажучи, в сучасних публікаціях є опис питання про сприйняття архітектурного

середовища людиною [11; 15; 22; 23]. Однак вони теж застаріли через те, що протягом попередніх кількох років розкрито нові процеси та особливості сприйняття простору міста. Вони стосуються всіх якостей архітектури та містобудування – від їхнього історизму [19] [20] до пошуку нових підходів [17].

Потрібно виявляти нові траки рефлексій людей у просторі міст, і нові рефлексії моделей сімей, які створюють та будуть створювати далі покоління X, Y, Z та A. Авторами теорії поколінь є два американські дослідники – Нейл Хоу та Вільям Штраус.

Оцінка особливостей кожного з нових поколінь у науковій літературі не є однозначною. Вона залежить від погляду конкретного дослідника. У публікаціях часто спостерігається вузькопрофільний підхід вчених до цього питання. В результаті багато інших, таких же важливих якостей нових поколінь просто ігноруються. Що веде до некоректних висновків.

Існують і інші погляди на сім'ю майбутнього, на суть людини майбутнього. Причому, не менш несподівані, ніж усе викладене вище. Вони пов'язані з тим, що людство має відмовитися від суспільства споживання та перейти на інші моделі своєї організації. Таке розуміння з'явилося не на порожньому місці.

Спеціальні дослідження показали, що існування суспільства споживання приведе людство до самознищення. Що війни у ньому неминучі, включаючи світові. Як неминуче і знищення цивілізацією самої природи, і себе, як біологічного виду, який зможе трансформувати свій організм під моделі резонансного взаємодії з планетою і з Космосом.

Апологетами суспільства споживання вже зараз визнається, що людству загрожує занепад особистої та державної моралі, що виявляється вже зараз у глибокому розпаді в багатьох країнах основних ідеалів права і законності, у споживчому егоїзмі, у загальному зростанні кримінальних тенденцій, у націоналістичному та політичному тероризмі, що став

міжнародним лихом, у руйнівному поширенні алкоголізму та наркоманії.

У різних країнах причини цих явищ є різними. В основі такого стану справ – внутрішня бездуховність, за якої особиста мораль і відповідальність людини витісняються і пригнічуються абстрактним і нелюдським за своєю сутністю, відчуженим від особистості авторитетом – державним, класовим чи партійним, а також авторитетом вождя. Не складно побачити, що багато моделей сімей найближчого майбутнього, описані вище, демонструють саме це.

Інші загрози – зростання населення планети, виснаження природних ресурсів, порушення природної рівноваги в середовищі, яке, до того ж, зараз дуже швидко змінюється у зв'язку зі зміною космічних факторів, які моделюють принципово нові матриці взаємодій ендегенних, екзогенних та антропогенних процесів.

І, нарешті, головна загроза: суспільство споживання може загинути у великій термоядерній війні. Уникнувши великої війни, людство може загинути також у великій кількості малих воєн, у міждержавних та міжнародних конфліктах, пов'язаних із політичним та економічним авантюризмом.

У результаті, Майкл Кремо, наприклад, базуючись на ведизмі, дійшов до висновку, що почалася деволуція людства, його рух назад, від розумного – до людства, що втратило розум [13].

Доречно згадати цитату, накреслену всередині піраміди Хеопса: «Сучасне людство загине від незнання законів природи та від невміння використовувати їх для свого життя».

У викликах, що склалися, з'являються, все-таки і здорові пропозиції. Вони засновані на тому, що необхідно переглянути модель існування людини на Землі в цілому. У доповіді ПРООН у цьому контексті розглядаються три умови, необхідні для започаткування процесу позитивної трансформації: масштабне впровадження рішень, орієнтованих на природу; переорієнтування систем державної та

фінансової підтримки; зміна соціальних норм. Ключовим висновком Доповіді є те, що головним бар'єром на шляху трансформацій та подальшого людського розвитку залишається нерівність як усередині країн, так і між ними. Існуюча нерівність між людьми є як причиною, так і наслідком того тиску, який ми чинимо на планету.

Багато фахівців вивчають технічні аспекти розвитку західноєвропейської цивілізації, що має вплив на моделі родини. Їхні висновки критичні: повна заміна ручної праці роботизованою; поява штучного інтелекту в усіх сферах життя (люди стануть непотрібними; буде введено заборону на репродукцію дітей; припинення розвитку родових ліній переважної більшості людей; перехід еліти на інший вид; захоплення влади штучним інтелектом, стерилізація та інші зміни); а також зникнення суверенних держав та управління Землею світовим урядом.

Все це означає одне: за межами найближчих десятиліть, на які ми намагаємося прогнозувати шляхи трансформації найбільших міст, у тому числі з урахування моделі родини, ставлення до міст зміниться. У такій кількості і в тих мінливих якостях, які можна відчуті зараз, міста або їх частини не будуть потрібні. Мабуть, відбудеться кардинальна зміна малюнка системи розселення людства планети.

У зв'язку із сказаним зрозуміло, чому в наукових публікаціях тепер з'являються нові трактування поняття «стабільний розвиток». Тепер цей розвиток прагне інших цілей [3; 10]. У сфері сталого розвитку [1]. Їх близько двох десятків. Для досягнення кожної мети потрібно вирішити щонайменше 9–10 завдань.

Якщо це вдасться зробити, це означатиме, на думку експертів, що виникне нова формула розвитку людської цивілізації. На бази зовсім інших трактувань моделей родин. Ці ідеї нагадують те, що вже запропонували Ж. Фреско, М. Руденко, М. Мельник, І. Стольтенберг та інші.

Британський соціальний теоретик Джон Уррі критикує соціальні науки, кидає виклик. ФОРМУЛА «МАЙБУТНЬОГО НЕМАЄ, ТОМУ ЧАС НЕ ПОТРІБЕН ДЛЯ ОПИСУВАННЯ СВІТУ», дуже тісно переплітається з ідеями видатних фізиків ХХ століття, які створили ТЕОРІЮ ПЕТЛЕВОЇ КВАНТОВОЇ ГРАВІТАЦІЇ Карло Ровеллі, Лі Смоліна, іншими, які довели, що часу у його нинішньому розумінні, як і простору, немає.

Таким чином, сучасна наука наблизилася до розуміння відсутності простору та часу, які були розроблені за тисячі років до нашої ери гностиками. Потім вдруге прочитані у манускриптах, знайдених у Наг Хаммаді у 1945 (1947?) році та виявлених в інших давніх текстах.

У контексті досліджень різних явищ і процесів в архітектурі та містобудуванні це означає, що так званий історико-еволюційний підхід до розгляду генеральних планів міст та архітектури в цілому – хибний напрямок, в якому немає жодного сенсу, оскільки він спирається на помилкові уявлення про фізичні процеси [2; 5; 6]. Більше того, він взагалі суперечить відомим законам фізики. Хоча історичний підхід до розвитку генпланів міст прийнятий чи не всіма як істина, яка не вимагає доказів – від студентів архітектурних факультетів до докторів архітектури [19; 20].

Тому питання трансформації селітебних територій найбільших міст і в Західній Європі, і в Україні, зокрема – у місті Дніпро, треба підходити інакше. З позиції інших теорій. Таким чином, виникає питання: а поняття «МАЙБУТНЄ» з цих позицій – це тепер що? Термін «концепція майбутнього» – це про що [4; 7]?

Існують наукові публікації, які можна узагальнено назвати так: «коротка історія міст майбутнього», «ІСТОРІЯ МАЙБУТНЬОГО», «Коротка історія майбутнього (світ у найближчі 50 років)» (наприклад, книга французького політика Жака Атталі). У полі зору вчених – уявлення про майбутнє, утопію, антиутопію, 3D-побут, 3D-місто, і навіть 3D-людина [6].

А також багато іншого, включаючи ту саму мобільність, про яку згадано вище.

МОБІЛЬНІСТЬ З МЕТАМОДЕРНИЗМОМ, з ЦИФРОВИМ КАПІТАЛІЗМОМ [2].

З висновків Джона Уррі випливає, що як такої науки, яка б займалася майбутнім, зокрема майбутнім архітектури та містобудування, немає. Отже, немає і принципу історичної приймальності етапів розвитку генеральних планів міст, про який написано багато книг. І про розповідається студентам архітектурних факультетів.

Серед робіт про технологічні уклади, які безпосередньо визначають життя соціуму у найбільших містах – книга «Третя хвиля» футуролога Елвіна Тоффлера. Кожна технологічна хвиля (технологічна революція) породжує нову цивілізацію, нові моделі родин та нові концепції будівель, споруд та міст. Між хвилями завжди існує конфлікт, у якому майбутнього не видно.

Кожній цивілізації притаманний свій особливий світогляд, своя мораль, свій спосіб життя, своя група моделей родин. Причому світогляд, принципи та інститути нової хвилі не виростають еволюційно з тих самих елементів ранньої хвилі, а формуються на основі свого унікального геному нової цивілізації [10]. Це знову і знову говорить про те, що спадкоємність як ідея – хибна річ. Колізії хвиль носять не еволюційний, а революційний характер, а прихід нової хвилі пов'язаний з війнами, революціями та іншими потрясіннями. Третя хвиля принесла із собою нову інфосферу. Настала ера демасифікованих засобів інформації, яка вплине на те, як формується наше уявлення про навколишній світ.

Відповідно до теорії Е. Тоффлера, головною сировиною нової економіки стануть інформація та уява. За допомогою інформації та уяви буде знайдено заміну більшості невідновлюваних ресурсів сучасної цивілізації. У зв'язку з безпрецедентним зростанням значення інформації людство реструктурує освіту, перебудує науково-дослідні роботи та, головне, реорганізує систему комунікацій.

Експерти стверджують, що третя хвиля не є ні утопією, ні антиутопією. Вона пропонує позитивну та революційну альтернативу майбутнього, яка, проте,

лежить у межах реалістично досяжного. Що є практопія.

Є дослідники, які прийшли до складніших понять та уявлень. Включаючи уявлення про архітектуру та містобудування. Серед них – таке явище, як АДАПТИВНІСТЬ ЛЮДЕЙ ТА ЇХ РОДИН ДО ПОСТОЯННИХ, ЩО ЙДЕ БЕЗ ПЕРЕРВ, ЗМІН СВІТУ.

Проблема настільки складна, що про неї треба говорити всюди та голосно. Наприклад, чи можна мати теорію освіти, яка готує людей до майбутнього, що постійно змінюється? Чи можна дійти згоди з майбутнім, що постійно змінюється? Як має виглядати нова теорія адаптації? Та відповідні моделі родин?

Вільям Огберн у своїй теорії культурного відставання показав, як соціальний стрес виникає з нерівної швидкості змін, які у різних секторах суспільства. Повинна існувати рівновага як між швидкістю змін у різних секторах, а між швидкістю зміни оточення і обмеженою швидкістю людської реакції. Зараз же видно розрив між ними, що збільшується.

Раніше люди вивчали минуле, щоб зрозуміти сьогодення. Що було методологічною оманю. Зараз Вільям Огберн пропонує повернути дзеркало часу та зрозуміти, як образ майбутнього визначає наше сьогодення. Фактично цей автор свідомо чи мимоволі використовує теорію ментальних образів-афірмацій. В той час як Френк Кінслоу враховує взаємодії зі свідомістю, яка не знаходиться в мозку, яка не є властивістю людини, а є єдиним полем, що проявляється через форми. Це база для того, щоб моделювати новітні моделі родин та їх фізичне середовище. У тому числі – архітектурно-містобудівне. Це узгоджується також з низкою інших сучасних теорій. Наприклад, теорія Германа Мінковського вказує на те, що минуле, сьогодення та майбутнє існують одночасно. І ми лише ковзаємо по просторах, а не рухаємося за стрілою часу. Його розуміння простору – розмова окрема. Однак квантова теорія свідомості стверджує, що немає ні часу, ні

простору. Що це – ілюзія, яка створюється мозком.

У деяких публікаціях стверджується, що ЕВОЛЮЦІЯ (ЗНОВУ ІДЕЯ З ЧАСОМ) СТАЄ МІРОЮ РЕЧЕЙ. У питаннях оцінки ставлення до концепцій трансформації селітебних територій найбільших міст це можна спробувати застосувати. Але питання – на якій методологічній основі? Серед таких спроб – опора на фрактальність фізичного світу. І його еволюція теж фрактальна! Однак квантова фізика доводить: еволюції не існує і не може існувати. Це означає, що моделі «розвитку» (ПОДІЛЕННЯ НА ЧАСТИНИ), а не «світу» (СПОЛУЧЕННЯ РАНІШІ РОЗПАЛИХ ЧАСТИН У ЦІЛЕ) структури селищної території найбільшого міста потрібно розглядати умовно, доки не будуть завершені дослідження, як якусь матрицю планувально напружених силових ліній – фракталів, в яких існують біфуркації та точки злиття структурних напруг у генеральному плані найбільшого міста. Включаючи точки напруг стосовно родин різних моделей. І визначити, які з них переможуть. Що свідчить про те, що умовний світ та родини полівалентні. А планувальні структури генеральних планів умовно завжди спираються на зони напруги процесів інтерференції енергій у фізичному світі в рамках гри мозку в дуальний ілюзорний світ.

Фрактальність еволюції генерального плану будь-якого міста, фрактальність моделей родин робить їх так зване дуальне майбутнє непередбачуваним у принципі. Наука не знає законів необоротного утворення фрактальних структур та їх розвитку. Прогнозу піддається лише розвиток псевдоеволюційних (дуальних) гілок між точками розгалуження.

Будь-який прогноз трансформації моделей родин у містобудуванні та архітектурі, як і сама архітектура та містобудування, мають бути поліваріантними, в контексті бінарності ментального світу. Вони повинні передбачати кілька сценаріїв розвитку функціонально-планувальних подій. Фрактальність так званої архітектурної та містобудівної еволюції

робить наше майбутнє хитким. Перебуваючи на одній із гілок еволюційного вузла, ми можемо не досягти успіху, а то й зовсім загинути, проте це не означає, що ми жили даремно. Але і це – в контексті ілюзії дуальності.

Негаусові розподіли всього генерують фрактал і в соціумі, і в містобудівних структурах. Життєва неуспішність більшості людей та їх родин, як і неадекватні рішення у містобудуванні, перетворили сучасні найбільші міста на театри архітектурно-містобудівних помилок, зумовлені мутаціями та самореплікаціями процесів соціальної «еволюції». Якби світ був гауссів, розчарованих життям та світом було б набагато менше.

Дедалі більше явищ у поведінці генеральних планів найбільших міст, у поведінці їх селитебних зон, поведінці механізмів подальшої трансформації селитебних зон призводять й іншим залежностям. У тому числі – до залежностей на основі нелінійних функцій.

Все це підводить до того, що матриці розподілу соціальної структури мешканців найбільшого міста з точки зору визначення схем її впливу на функціонально-планувальну структуру найбільшого міста повинні вивчатися і з економічної точки зору, що створює палітру високих чи низьких платоспроможностей різних соціальних груп за житло. І, таким чином, формують карту розподілу різних типів житлових будинків з різними типами квартир, різними типами кімнат у квартирі, різним трактуванням меблів (включаючи той факт, що потреба фізичної присутності деяких предметів у квартирі зникне. Вони будуть створюватися у просторі на основі голографії та низки інших сучасних технологій; весь декор кімнат стане цифровим, включаючи види з вікна) для описаних вище форм сімей. Вони ж впливають на показники концентрації та деконцентрації населення селітебної зони найбільшого міста. Що, своєю чергою, змінює підходи до принципів розміщення багатоповерхових житлових будинків, будинків середньої поверховості та малоповерхових будинків.

У суспільстві споживання факт появи сімей нових видів пов'язані з економічною нерівністю населення. По суті весь західний світ сьогодні поділений на дві частини. Менша – пул країн «золотого мільярда», що збільшується, перейшли до кейнсіанської економіки успіху [4]. Інші країни продовжують «економити» на зарплаті працівника, що тримає їхню економіку на низькому рівні. В результаті стара проблема надмірного розшарування населення проявляється сьогодні у взаєминах між багатими та бідними регіонами. Між багатими районами у мегаполісах та мегалополісах та їх бідними районами. Час переходити на міждержавне та міжрегіональне кейнсіанство. Воно призведе до зміни класифікації міст, зміни їх планувальних структур, зміни їх місії і потенціалу загалом.

Кейнсіанська ідея [4] змінює систему соціальних відносин та моделі родин абсолютно в кожному місті. Вона вимагатиме «кейнсіанського» мислення, що усуває проблему нерівності, і в цьому будуть, за даними експертів, зацікавлені і бідні та багаті. Якщо припустити, що ідея приживеться, то це означатиме, що відбудеться ще один перегляд форм сімей, описаних вище та, відповідно, типів квартир, типів будинків з ними, типів містобудівних комплексів на основі таких будинків. З'являться нові концепції багатоступеневої системи обслуговування. Якщо зараз в її основі – три ступені, кожен з яких формує свій містобудівний елемент (житлова група, житловий мікрорайон, житловий район, місто), то в змінених умовах виникнуть дисперсно розосереджені, а також нові гібридні містобудівні фармації, що створюються новим укладом життя, новими формами зайнятості населення та новими моделями потреб для яких змінене багатоступеневе обслуговування та створюватиметься.

Іншими словами, кейнсіанський підхід до структурування селітебної території найбільшого міста є об'єктивним.

Але оскільки цей підхід теж не всеосяжний, його не можна назвати

остаточним. Бо зараз швидко змінюється сама структура фізичного світу. Змінюються швидкість ходу «часу», щільність та мірність «простору». Через швидкий і все швидкий хід соціальної еволюції і внаслідок її фрактальності змінюється природа самої наукової картини світу, вона стає в дуальному, ілюзорному сприйнятті людини все більш лабільною і багатоваріантною. Вона народжує в селітебних зонах багатоваріантні містобудівні структури, що співіснують одночасно і часто взагалі не показують будь-якої взаємодії один з одним.

У перспективі вона зміниться ще раз і стане максимально жорсткою до людини. Точніше, змусить людину перейти від суб'єктивності до об'єктивності моделей життя у місті. В її основу остаточно увійдуть енергоінформаційні та космічні процеси. Які теж – наслідок дуальності.

Світова криза, що почалася в 2008 році, проходила різні стадії, багато з яких важко було передбачати.

За його лаштунками стоять його творці - світові транснаціональні олігархічні групи та пов'язані з ними держави-лідери у світовій економіці. За допомогою штучно створюваних криз вони вкотре в історії змінюють світовий політичний та економічний ландшафт на планеті. У тому числі – методами керованого хаосу, одним із інструментів яких є регіональні та світові війни. Процес цей значною мірою закритий. У ньому не посвяченому в такі процеси не розібратися: надто багато факторів та процесів носять прихований та не публічний характер. Його дослідження під силу лише тим фахівцям, які мають доступ до інформації у цій галузі знань. На рівні Дніпра ми лише пожинаємо те, що іноді відбувається на різних рівнях цієї Великої Світової Ігри.

У Світі вже проявили себе принципово нові моделі економік міст, розраховані на найближчі десятиліття [18]. Які і підштовхують до створення нових моделей родин. Проте їх не хочуть вивчати та адаптувати до наших умов як економісти, так і архітектори. Архітектори – дослідники та архітектори-практики не наділені

необхідним обсягом професійних економічних та соціальних знань щодо таких процесів, у зв'язку з чим давати свої оцінки та висновки щодо трансформації міста не зможуть. Необхідні відповіді можуть бути отримані лише внаслідок співпраці архітекторів – містобудівників із вченими відповідних суміжних галузей знань. Поки цього немає, продовжуються локальні спроби окремих груп практикуючих архітекторів запропонувати свої суб'єктивні та не обгрунтовані погляди на розвиток міста. Аналіз їхніх пропозицій переконує дослідників у тому, що вони не наукові. Вони не охоплюють усієї повноти містобудівних явищ, які потрібно враховувати у цьому випадку.

Висновки

1. Моделі сім'ї на кожному етапі історії людства визначали номенклатуру та внутрішні характеристики житлових будинків: їхнє внутрішнє планування, їхнє об'ємно-просторове рішення, способи розташування на місцевості, принципи створення з будинків різних типів містобудівних ансамблів, специфіку територіальної взаємодії з різними функціональними зонами міста, правила експлуатації житла, термін його використання, алгоритми обслуговування, напрями подальших трансформацій.

2. Моделі сім'ї та їх зв'язок із специфікою житлових будинків та житловою забудовою міста циклічно змінювалися під впливом резонансу з комбінаториками природних, соціально-економічних та космічних циклів. Зміна циклів означала зміну моделей сім'ї та відповідних архітектурно-містобудівних аспектів житлової забудови та структури міста загалом.

3. Подальші трансформації моделей сімей та адекватної їм житлової забудови пов'язані як із зміною людини як біологічного виду, так і зі зміною дуальної фізичної природи земного світу. Темпи змін нарастають, що ставить людство перед необхідністю розвороту спеціальних масштабних досліджень, що відбувається з метою розуміння відповіді на запитання:

куди все йде, що на нас чекає попереду і як на це мають реагувати архітектура та містобудування?

АРХІТЕКТУРНО-МІСТОБУДІВНІ АСПЕКТИ МОДЕЛІВ РОДИНИ МАЙБУТНЬОГО ЯК ФАКТОРИ НАСТУПНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ СЕЛИТЕБНИХ ТЕРИТОРІЙ ВХОДЯТЬ В РЕЖИМ ІМОВІРНІСНІЙ ВАРІАТИВНОСТІ І ВАРІАТИВНІЙ ІМОВІРНІСТЬ. У ЗВ'ЯЗКУ З ЦИМ ВОНИ НЕ МОЖУТЬ ПРОГНОЗУВАТИСЯ З ДОСТОВІРНЮЮ ТОЧНІСТЮ. ЩО ПОВ'ЯЗАНО З АКТИВІЗАЦІЄЮ ІМОВІРНІСТІ МАТЕРІАЛЬНОГО ТА ЕНЕРГО-ІНФОРМАЦІЙНОГО СВІТУ.

ІМОВІРНІСТЬ, У ЯКІЙ ВІН В СПРАВЖНИЙ ЧАС ВХОДИТЬ.

Однак локальні, наближені до об'єктивності, когерентності у цих процесах можна виявляти.

По суті щодо заявленої у статті теми, а також інших тем, пов'язаних із трансформацією селитебних територій міст, можна стверджувати : те, що ми переживаємо як проблему, народжується з обмеженого погляду, з точки сприйняття, яка відокремила себе від справжнього цілого.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бармашина Л. М. Універсальний дизайн як складова соціальної екології. *Сучасні проблеми архітектури та містобудування*. 2015. Вип. 40. С. 341–348.
2. Біленчук П. Д. Е-суспільство : цифрове майбутнє України. УкрДГРІ, 2018. 216 с.
3. Білоконь Ю. М. Типологія містобудівних об'єктів. Київ, 2001. 68 с.
4. Блауг М. Кейнсианская система. *Экономическая мысль в ретроспективе*. Москва : Дело, 1994. С. 607–629.
5. Воробьев В. В., Шило О. С. Пространственные рефлексии человека как отражения эниологической структуры среды. *25 лет познания пространственно-волновой субстанции мировоззренческих представлений : XI Междунар. науч.-практ. конф.* (г. Днепр, 08–09 ноября 2019 г.). 2019. С. 83–95.
6. Воробьев В. В., Мерилова И. А. Матрицы предопределенностей в истории архитектуры будущего. *Архитектурный вестник КНУБА*. 2018. Вип. 16. С. 360–367.
7. Воробьев В. В. Экополис. Мир звездного будущего. Книга XXI века. Днепр : Журфонд, 2020. 812 с.
8. Денисик Г. І. Антропогенне ландшафтознавство : навч. посіб. Ч. І. Глобальне антропогенне ландшафтознавство. Вінниця : ПП «ТД Видавництво Едельвейс і К», 2012.
9. Дипак Биссария. Брак в современном обществе. 352 с.
10. Доценко А. І. Територіальна організація розселення (теорія та практика). Київ : Фенікс, 2010. 536 с.
11. Колин Эллард. Среда обитания : как архитектура влияет на наше поведение и самочувствие. Перев. Анастасии Васильевой, Елены Корюкиной. Альпина Паблишер, 2017. 288 с.
12. Кольчик С. Новая семья : гостевой брак, лоскутная семья и другие форматы отношений в современном мире. Kindle Edition, 240 с.
13. Кремо Майкл Деволуция человека. Ведическая альтернатива теории Дарвина. 2014. 800 с.
14. Осітнянко А. П. Планування розвитку міста. Київ : КНУБА, 2005. 386 с.
15. Сердюк І. І. Сприйняття архітектурного середовища. Львів : Вища школа, 1979. 202 с.
16. Тоффлер Э. Шок будущего. Пер. с англ. Э. Тоффлер. ООО «Издательство АСТ», 2004. 557 с.
17. Царенко С. О., Литвинов А. І. Адаптація історичної забудови у системі управління розвитком поселень. *Вісник ВПІ*. 1997. № 4. С. 31–35.
18. Чандрян Наїр. Держава сталого розвитку. Майбутнє урядування, економіки та суспільства. Вид-во «Наш формат», 2020. 220 с.
19. Черкес Б. С., Лінда С. М. Історизм в архітектурі незалежної України. *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. Серія : *Архітектура*. 2010. № 429. С. 114–132.
20. Черкес Б. Традиція та ідентичність в новій українській архітектурі. *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. Серія : *“Архітектура”*. 2003. № 486. С. 71–91.
21. Шищенко П. Г. Антропогенные преобразования современных ландшафтов. *Природная среда и хозяйственная деятельность человека*. Киев : КГУ, 1985. С. 114–131.
22. Шубович С. А. Мифопоэтический феномен архитектурной среды: монография. Харків : ХНАГХ, 2012. 177 с.
23. Яковлев М. І. Геометричні принципи художнього формоутворення : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.01.03. Київ : КНУБА, 1999. 33 с.

REFERENCES

1. Barmashyna L.M. *Universalnyi dyzain yak skladova sotsialnoi ekolohii* [Universal Design as a Component of Social Ecology]. *Suchasni problemy arkhitektury ta mistobuduvannia* [Modern Problems of Architecture and Urban Planning]. 2015, iss. 40, pp. 341–348. (in Ukrainian).
2. Bilenchuk P.D. *E-suspilstvo : tsyfrova maibutnie Ukrainy* [E-Society : Ukraine's Digital Future]. UkrDGRI, 2018, 216 p. (in Ukrainian).
3. Bilokon Yu.M. *Typolohiia mistobudivnykh ob'ektiv* [Typology of Urban Planning Objects]. Kyiv, 2001, 68 p. (in Ukrainian).
4. Blaug M. *Keinsianskaia sistema* [The Keynesian System]. *Ekonomicheskaiia mysl' v retrospektive* [Economic Theory in Retrospect]. Delo Publ., 1994, pp. 607–629.
5. Vorobiov V.V. and Shylo O.S. *Prostranstvennye refleksii cheloveka kak otrazheniia eniologicheskoi struktury sredy* [Human Spatial Reflections as a Reflection of the Eniologicheskoi Structure of the Environment]. *25 let poznaniia prostranstvenno-volnovoi substantsii mirovozzrencheskikh predstavlenii : XI Mezhdunarodnaia nauchno-prakticheskaiia konferentsiia* [25 years of Knowledge of the Spatial-Wave Substance of Worldview Ideas : XI International scientific-practical conference]. November 8–9, 2019, Dnipro, 2019, pp. 83–95. (in Russian).
6. Vorobiov V.V. and Merilova I.A. *Matritsy predopredelennosti v istorii arkhitektury budushchego* [Matrices of Predetermination in the History of Future Architecture]. *Arkhitekturnyi visnyk KNUBA* [Architectural Bulletin of KNUBA]. 2018, iss. 16, pp. 360–367. (in Russian).
7. Vorobiov V.V. *Ekopolis. Mir zvezdnogo budushchego. Kniga XXI veka* [Ecopolis. World of the Starry Future. Book of the 21st Century]. Dnipro : Zhurfond Publ., 2020, 812 p. (in Russian).
8. Denysyk H.I. *Antropohenne landshaftoznavstvo. Chastyna I : Hlobalne antropohenne landshaftoznavstvo* [Anthropogenic Landscape Science. Part I : Global Anthropogenic Landscape Science]. Vinnytsia : Edelveis i K, 2012. (in Ukrainian).
9. Bissariya Dipak. *Brak v sovremennom obshchestve* [Marriage in modern society]. 352 p. (in Russian).
10. Dotsenko A.I. *Terytorialna orhanizatsiia rozselelnia (teoriia ta praktyka)* [Territorial Organization of Settlement (Theory and Practice)]. Kyiv : Feniks Publ., 2010, 536 p. (in Ukrainian).
11. Ellard Colin. *Sreda obitaniia : kak arkhitektura vliiaet na nashe povedenie i samochuvstvie* [Habitat : how architecture affects our behavior and wellbeing]. Transl. by A. Vasilieva and E. Koriukina. Alpina Publisher, 2017, 288 p. (in Russian).
12. Kolchuk S. *Novaia sem'ia : Gostevoi brak, loskutnaia sem'ia i drugie formaty otnoshenii v sovremennom mire* [The new family : visiting marriage, patchwork family, and other relationship formats in the modern world]. Kindle Edition, 240 p. (in Russian).
13. Cremon Michael. *Devoliutsiia cheloveka. Vedicheskaiia alternativa teorii Darvina* [Human devolution : a vedic alternative to darwin's theory]. 2014, 800 p. (in Russian).
14. Ositniianko A.P. *Planuvannia rozvytku mista* [Urban Development Planning]. Kyiv : KNUBA Publ., 2005, 386 p. (in Ukrainian).
15. Serdiuk I.I. *Spriiniattia arkhitekturnoho seredovyscha* [Perception of the Architectural Environment]. Lviv : Vyshcha Shkola, 1979, 202 p. (in Ukrainian).
16. Toffler A. *Shok budushchego* [Future shock]. Transl. from Engl. AST Publishing, 2004, 557 p. (in Russian).
17. Tsarenko S.O. and Lytvynov A.I. *Adaptatsiia istorichnoi zabudovy u systemi upravlinnia rozvytkom poselen* [Adaptation of historical buildings in settlement development management]. *Visnyk VPI* [Bulletin of VPI]. 1997, no. 4, pp. 31–35. (in Ukrainian).
18. Nair Chandran. *Derzhava staloho rozvytku. Maibutnie uraduvannia, ekonomiky ta suspilstva* [The sustainable state : the future of governance, economy and society]. Nash Format Publ., 2020, 220 p. (in Ukrainian).
19. Cherkes B.S. and Linda S.M. *Istoryzm v arkhitekturi nezalezhnoi Ukrainy* [Historicism in the architecture of independent Ukraine]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Serii : Arkhitektura* [Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series : Architecture]. 2010, no. 429, pp. 114–132. (in Ukrainian).
20. Cherkes B.S. *Traditsiia ta identychnist v novii ukrains'kii arkhitekturi* [Tradition and Identity in New Ukrainian Architecture]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Serii : Arkhitektura* [Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series : Architecture]. 2003, no. 486, pp. 71–91. (in Ukrainian).
21. Shyshchenko P.H. *Antropohennye preobrazovaniia sovremennykh landshaftov* [Anthropogenic transformations of modern landscapes]. *Prirodnaia sreda i khoziaistvennaia deiatel'nost' cheloveka* [The Natural Environment and Human Economic Activity]. Kyiv : KSU Publ., 1985, pp. 114–131. (in Russian).
22. Shubovych S.A. *Mifopoeticheskii fenomen arkhitekturnoi sredy: monografiia* [The mythopoetic phenomenon of the architectural environment : a monograph]. Kharkiv : Kharkiv National Academy of Municipal Economy, 2012, 177 p. (in Russian).
23. Yakovlev M.I. *Heometrychni pryntsypy khudozhnogo formoutvorennia : avtoref. dys. d-ra tekhn. nauk : 05.01.03* [Geometric principles of artistic form formation : abstract of Doctoral Dissertation in Technical Sciences]. Kyiv : KNUBA Publ., 1999, 33 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 12.09.2025.

УДК 69.057

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.61.1191

ЛЕГКІ ШВИДКОМОНТОВАНІ КОНСТРУКЦІЇ ДЛЯ ЗВЕДЕННЯ СПОРУД ГРОМАДСЬКОГО І ПРОМИСЛОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

ГАРКУША В. С.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
СИМОНОВ С. І.², канд. техн. наук, доц.,
МАКСИМЮК О. І.³, маг.

^{1*} Кафедра архітектури, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, 87555, Маріуполь, Україна, тел. +38 (099) 772-68-78, e-mail: harkusha_v_s@pstu.edu, ORCID ID: 0000-0002-5016-0737

² Кафедра архітектури, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», вул. Університетська, 7, 87555, Маріуполь, Україна, тел. +38 (050) 590-61-91, e-mail: arhsimonov1@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3921-0131

³ Чернівецька обласна організація Товариства Червоного Хреста України, вул. І. Дзюби, 31, 58000, Чернівці, Україна, тел. +38 (050) 700-09-15, e-mail: maksimiyuk@ukr.net

Анотація. Постановка проблеми Було виконано аналіз конструктивних та технічних особливостей тимчасових споруд з легких швидкомонтованих конструкцій. Дослідження показали, що легкі швидкомонтовані конструкції є вигідною альтернативою капітальним спорудам промислового і громадського призначення. Легкі швидкомонтовані конструкції є багато функціональними та можуть бути використані повторно будь-якому іншому місці у разі необхідності. Серед частин, які не можна використати повторно тільки фундамент під споруду. Споруди з легких конструкцій є мобільними спорудами. Їх здатність до повторного використання дозволяє зменшити час на їх зведення та підвищити ефективність монтажних робіт. **Аналіз публікацій** Детально розглянуто питання зведення швидкомонтованих споруд в розрізі технології виконання робіт та чинників, які впливають на ефективність виконання цих робіт. **Мета статті** Обґрунтування параметрів зведення легких швидкомонтованих конструкцій як елементів промислових та громадських споруд тимчасового призначення. **Виклад матеріалу** Розглянуто конструктивні та технічні особливості споруд промислового та громадського призначення з легких швидкомонтованих конструкцій. Визначено сфери використання споруд з легких конструкцій та встановлено технологічні вимоги щодо влаштування фундаменту під тимчасові споруди. **Висновок** Легкі швидко монтовані конструкції – це альтернатива капітальним будівлям з точки зору енергоефективності, надійності експлуатації та оригінальності дизайну. Такі споруди за будівельними нормативами вважаються тимчасовими спорудами.

Ключові слова: легкі швидкомонтовані конструкції; несучі елементи; стійкість; довговічність

LIGHT QUICK-ASSEMBLED STRUCTURES FOR CONSTRUCTION FOR PUBLIC AND INDUSTRIAL PURPOSES

HARKUSHA V.S.^{1*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
SIMONOV S.I.², Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
MAKSYMUK O.I.³, Master of Construction

^{1*} Department of Architecture, SHEI “Azov State Technical University”, 7, Universytetska St., Mariupol, 87555, Ukraine, tel. +38 (099) 772-68-78, e-mail: harkusha_v_s@pstu.edu, ORCID ID: 0000-0002-5016-0737

² Department of Architecture, SHEI “Azov State Technical University”, 7, Universytetska St., Mariupol, 87555, Ukraine, tel. +38 (050) 590-61-91, e-mail: arhsimonov1@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3921-0131

³ Chernivtsi Regional Organization of the Red Cross Society of Ukraine, 31, I. Dzyuba St., Chernivtsi, 58000, Ukraine, tel. +38 (050) 700-09-15, e-mail: maksimiyuk@ukr.net

Abstract. Statement of the problem. An analysis of the structural and technical features of temporary structures made of lightweight prefabricated structures was performed. Studies have shown that lightweight prefabricated structures are a profitable alternative to capital structures for industrial and public purposes. Lightweight prefabricated structures are multifunctional and can be reused in any other place if necessary. Among the parts that cannot be reused is only the foundation for the structure. Lightweight structures are mobile structures. Their ability to be reused allows you to reduce the time for their erection and increase the efficiency of installation work. **Publication analysis** The issue of constructing prefabricated structures is considered in detail in terms of the technology of performing the work and the factors that affect the efficiency of performing these works. **The purpose of the article.** Justification of the construction parameters

of lightweight prefabricated structures as elements of temporary industrial and public buildings. **Presentation of the material.** The structural and technical features of industrial and public buildings made of lightweight prefabricated structures are considered. The areas of use of lightweight structures are determined and technological requirements for the arrangement of foundations for temporary structures are established. **Conclusion** Lightweight, quickly assembled structures are an alternative to capital buildings in terms of energy efficiency, operational reliability, and originality of design. Such structures are considered temporary structures according to building codes.

Keywords: *lightweight quick-assembled structures; load-bearing elements; stability; durability*

Постановка проблеми. Легкі конструкції є одним із найбільш прогресивних методів будівництва, які отримали поширення у зв'язку не тільки з розвитком науки та техніки, а ще і у зв'язку з подіями, які останнім часом мають великий вплив на світ – епідемія COVID-19 та війна в Україні. Після вторгнення Російської федерації житловий фонд України суттєво зменшився. Одним із варіантів вирішення цієї проблеми є широке впровадження швидко споруджуваного житлового багатоповерхового житлового будівництва. Існує чимало різних видів швидкокомонтованих житлових будинків, один із найбільш розповсюджених з них є крупнопанельне будівництво.

Така технологія має як ряд переваг так і недоліки. Однак, зважаючи на ті складні обставини, в яких знаходиться країна, зведення швидко споруджуваних багатоповерхових будинків може бути вирішенням житлового питання для сотень тисяч громадян України, але не менш важливим є забезпечити людей тимчасовим прихистком та мобільними спорудами для тимчасового знаходження військових та всіх учасників процесів, які пов'язані з надзвичайними ситуаціями.

Найбільш цікавим прикладом таких споруд є проєкт медичного закладу, який був побудований з легких конструкцій, – це лікарня Mississauga Trillium (Канада), яка стала будинком для одного з провінційних центрів оцінки COVID-19 і потребувала збільшення своїх можливостей для потенційного припливу пацієнтів на основі прогнозів Public Health Ontario. Пружинна конструкція шириною 50 футів і довжиною 165 футів, з'єднана двома коридорами, була зведена на паркінгу сусідньому до будівлі лікарні.

Лікарня «Mississauga Trillium» завдяки тому, що була зведена тимчасова споруда з легких конструкцій отримала 90 додаткових ліжок, готових прийняти пацієнтів у разі

необхідності. Така споруда здатна витримати екстремальні вітрові і снігові навантаження. Лікарня планує не демонтувати та зберегти тимчасову споруду як частину закладу, щоб у майбутньому його можна було перепрофілювати.

Тимчасове приміщення має негативний тиск повітря, кисневі лінії, механічну систему для обігріву та охолодження та підняту сталеву підлогу на постаментах. Цей перший польовий госпіталь у м. Берлінгтон є «найбільш унікальним, тимчасовим, багаторазовим закладом» на сьогоднішній день в Онтаріо. Він оснащений негативним тиском повітря, кисневими лініями, механічною системою для обігріву та охолодження та піднятою сталевую підлогою на постаментах. Будівельникам довелося зіштовхнутися з тим, що ділянка не мала доступу до питної води, каналізаційної системи та достатньої кількості аварійного живлення. У випадку з такими тимчасовими приміщеннями зазвичай нічого такого немає.

Наразі уряд України розробляє та втілює велику кількість проєктів, які направлені на поліпшення матеріального стану та стану психологічного здоров'я людей, які постраждали від військових дій, як серед військових, так і серед цивільного населення.

Яскравим прикладом такого проєкту є державна програма “Титани UA” (Дніпропетровська область). Ідея спрямована на виховання культури толерантного ставлення до ветеранів після їх повернення до цивільного життя.

Проєкт представляє історії оборонців, які показують можливість подолати всі виклики та довести, що життя триває. Учасниками проєкту стали воїни, які отримали бойовий досвід і поранення різного ступеня тяжкості. Попри це, вони не здалися та досягли значних успіхів у кар'єрі, спорті й творчості.

За принципом «рівний рівному» ці ветерани є провідниками на шляху реінтеграції в цивільне життя після війни і звичайно, що такі державні проєкти передбачають влаштування інфраструктури для лікування та реабілітації тих, хто постраждав внаслідок воєнних дій в Україні, тому досвід Канади може стати для нас гідним прикладом.

Аналіз публікацій. Масивні будівельні рішення завжди асоціювалися з кращими тепловими характеристиками та краще відповідали різним критеріям продуктивності та будівельних норм. Проте системи полегшеної конструкції мають потенціал для досягнення очевидних переваг у порівнянні з традиційною важкою конструкцією [1].

Питанням сучасного стану та перспектив застосування багатоповерхових будинків, які швидко зводяться, в умовах України займалися такі вчені та фахівці як В. О. Плоский, Г. В. Гетун, М. В. Тимофєєв, В. І. Запривода [2], П. Є. Григоровський, А. П. Григоровський, О. В. Мурсьова, А. Н. Броневицький [3].

Серед іноземних науковців слід виділити Б. Дьорінг, М. Кюхнхен, О. Вассарт, С. Харпер, П. Бегуїн, С. Хербін, А. Сеппюнен, М. Лавсон, С. Яндзьо, Ф. Шеублін, В. Бейкенс [4] та ін.

В роботах вітчизняних та зарубіжних авторів достатньо уваги приділяється питанням зведення швидкоспоруджуваних будинків в розрізі технології виконання робіт та чинників, які впливають на ефективність виконання цих робіт.

Мета статті – обґрунтування параметрів зведення легких швидкокомонтованих конструкцій як елементів промислових та громадських споруд тимчасового призначення. В роботі на базі досвіду, отриманого в області зведення споруд з легких швидкокомонтованих конструкцій вказані основні принципи їх виготовлення, а також особливості конструкції, які дозволяють забезпечити несучу здатність таких споруд.

Виклад матеріалу. Дослідження були виконані згідно з діючими нормативними документами, які регламентують процес виготовлення легких швидкокомонтованих конструкцій і технічні характеристики

готових споруд. Проведено аналіз світового досвіду використання споруд, які зведені із легких швидкокомонтованих конструкцій.

Використання легких швидкокомонтованих конструкцій є достатньою умовою для отримання тимчасових споруд промислового або громадського призначення, які є стійкими до дії навколишнього середовища та навантажень різного характеру дії (стиск, розтяг, дія вітру та опадів).

Будівлі «Sprung», які можуть витримувати ураганні вітри та великі снігові навантаження, вони були встановлені в «двох полярно протилежних найгірших кліматичних умовах у світі». Польові лікарні мають клас енергоспоживання до R-30 і можуть працювати протягом кількох місяців, року чи довше.

Існує досвід будівництва двох польових госпіталів у Канаді. Обидва польові госпіталі мають площу понад 8000 квадратних футів у будівлі розміром 50 на 165 футів. Після розбирання приблизно 90 відсотків їхніх конструкцій придатні для повторного використання. З таких конструкцій зводять арени, басейни і пішохідні тунелі. Також за цією технологією було завершено будівництво трьох центрів відпочинку для бездомних у Торонто. На рисунку 1 зображено польовий госпіталь для боротьби з кризою COVID-19.

Переваги легких конструкцій:

1. Миттєва доставка інвентарю – завершити проєкти можна за набагато коротший термін, ніж звичайне будівництво, це рішення швидкого реагування.

2. Обмежені вимоги до фундаменту – з обмеженими вимогами до фундаменту розташування можна будувати у місцях, де неможливо побудувати звичайні споруди, включно з існуючим асфальтом, порожніми ділянками, навіть відкритими просторами, надаючи більше можливостей для густонаселених районів.

3. Швидкий графік будівництва дозволяє суттєво скоротити витрати та терміни будівництва в порівнянні зі звичайною конструкцією.

4. Чудова ефективна система ізоляції дозволяє заощадити витрати на експлуатацію та електроенергію – герметична

огорожувальна оболонка будівлі та повністю піднята система ізоляції зі скловолокна.



Рис. 1. Польовий госпіталь для боротьби з кризою COVID-19

Ресорні конструкції:

1. Пружинні конструкції можна демонтувати, змінювати конфігурацію, повторно зводити або переміщувати для будь-якої кількості застосувань, що забезпечує цінність таких споруд і пом'якшує фінансові ризики.

2. Крім укриття в будь-яку погоду, пружинні конструкції створюють світлу та просторну висоту, продуктивність та енергоефективне середовище.

Термін: доставка та будівництво – 17 днів для пружинної конструкції. Загальний термін виконання екстер'єру та інтер'єру – 22 дні.

Характеристики легких конструкцій:

1. Ширина конструкцій від 9 до 61 метрів без жодних внутрішніх опорних колон при необмеженій довжині.

2. Можливість складання, розбирання, переміщення на інші площі, легка зміна конфігурації.

3. Основний несучий елемент – двотаврова алюмінієва балка (рис. 2).

4. Модульна конфігурація з дизайну дозволяє додавати секції для збільшення обсягу займаної площі по довжині.

5. У разі прийнятних ґрунтових умов, відпадає необхідність у наявності фундаменту при монтажі конструкцій із шириною до 40 метрів.

6. Товщина 20...22 см утеплювального пакету з скловолокна забезпечує коефіцієнт теплового опору як у капітальній будови (рис. 3).



Рис. 2. Двотаврова алюмінієва балка

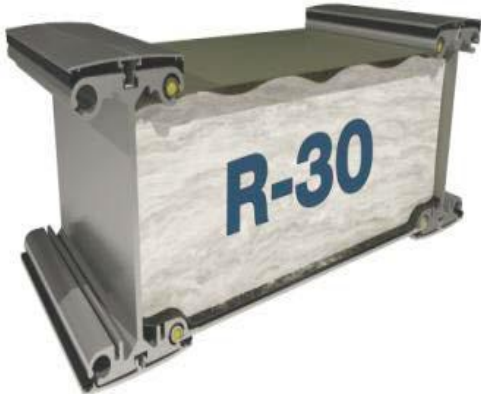


Рис. 3. Утеплювальний пакет

7. Легкі конструкції підходять під найсуворіші кліматичні умови.



Рис. 4. Архітектурна мембрана на основі ПВХ

Кольорова гама зовнішньої архітектурної мембрани будівлі (рис. 4) може бути обрана під поєднання фірмових кольорів, а також з будь-якого кольору. Внутрішня архітектурна мембрана будівлі з легких конструкцій пропонується в білому виконанні, оскільки це найбільш прийнятне рішення з точки зору світлового рішення.

Основний елемент каркаса – стрілчаста двошарнірна арка, що забезпечує жорсткість будівлі у поперечному напрямку. Її конструкція є однопрогоною без внутрішніх (поперечних) розпірок. Гілки арки виготовлені з прокатного двотавра складного перерізу.

Матеріал всіх конструктивних елементів – алюмінієвий сплав марки 6351 (аналог – АТ 35). Крок несучих арок у поздовжньому напрямку – 3,05 м. З площини арки розкріплені розпорки та підварки, які розташовані по півколу по торцях споруди.

По внутрішнім і зовнішнім граням гілок арки спеціально передбачені пази алюмінієвого профілю, які встановлюються і напружуються в архітектурні мембрани. Архітектурна мембрана є тришаровою полімерною плівкою. Простір між зовнішньою та внутрішньою архітектурними мембранами заповнюється теплоізоляційним пакетом, що складається зі скловолокна.

У піку будівлі розташовується «друге світло – природний ліхтар» у вигляді напівпрозорої мембрани, яка дозволяє пропускати додаткове сонячне світло вдень і є енергоефективною опцією будівлі, яка зменшує витрати на використання електроенергії.

Висновок

Збірно-розбірні конструкції (споруди) з натяжною покрівлею «Sprung» мають багато функціональне призначення. Завдяки використанню утеплювача з ефективними характеристиками, що розташовується по всій поверхні мембрани (натяжної покрівлі), конструкція являє собою альтернативу капітальній будові і є екологічно чистою та енергозберігаючою технологією.

Конструкція «Sprung» – це альтернатива капітальним будівлям з енергоефективності, надійності експлуатації та оригінальності дизайну. При цьому за будівельними нормативами вони є тимчасовою спорудою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Roque E., Oliveira R., Almeida R. M., Vicente R. D. & Figueiredo A. Lightweight and prefabricated construction as a path to energy efficient buildings: thermal design and execution challenges. *International Journal of Environment and Sustainable Development*. 2020. DOI: 10.1504/IJESD.2020.105465
2. Плоский В. О., Гетун Г. В., Тимофеев М. В., Запривода В. І. Енергоефективний панельний житловий будинок. Архітектура будівель та споруд : навч. посіб. під заг. ред. Г. В. Гетун. Київ : Вид-во Ліра, 2017. 190 с.
3. Григоровський П. Є. та інші. Аналіз світового досвіду та сучасних технічних рішень будівництва швидко споруджуваних житлових будинків. *Нові технології в будівництві*. 2022. Т. 41. С. 10–20. URL: <https://doi.org/10.32782/2664-0406.2022.41.2>
4. Döring B., Kuhnhenne M., Vassart O., Harper C., Beguin P., Herbin S., Seppänen A., Lawson M., Yandzio E., Scheublin F., Bakens W. Integrated pre-fabricated steel technologies for the multi-storey sector. Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities, 2009. 149 p. URL: <https://eur-lex.europa.eu/>

REFERENCES

1. Roque E., Oliveira R., Almeida R.M., Vicente R.D. and Figueiredo A. Lightweight and prefabricated construction as a path to energy efficient buildings: thermal design and execution challenges. *International Journal of Environment and Sustainable Development*. 2020. DOI: 10.1504/IJESD.2020.105465
2. Ploskyi V.O., Getun G.V., Tymofeiev M.V. and Zapruvoda V.I. *Enerhoefektyvnyy panel'nyy zhytlovyi budynok. Arkhitektura budivel' ta sporud : navch. posib. pid zah. red. H.V. Hetun* [Energy effective paneled residential house. Houses and construction architecture : tutorial, ed. Getun G.V.]. Kyiv : Lira-K Publ., 2017, 190 p. (in Ukrainian).
3. Grigorovsky P.E. et al. *Analiz svitovoho dosvidu ta suchasnykh tekhnichnykh rishen' budivnytstva shvydko sporudzhuvanykh zhytlovykh budynkiv* [Analysis of world experience and modern technical solutions for the construction of quickly constructed residential buildings]. *Novi tekhnolohiyi v budivnytstvi* [New Technologies in Construction]. 2022, vol. 41, pp. 10–20. (in Ukrainian).
4. Döring B., Kuhnhenne M., Vassart O., Harper C., Beguin P., Herbin S., Seppänen A., Lawson M., Yandzio E., Scheublin F. and Bakens W. Integrated pre-fabricated steel technologies for the multi-storey sector. Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities, 2009, 149 p. URL: <https://eur-lex.europa.eu/>

Надійшла до редакції: 12.09.2025.

УДК 69.624.1

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.67.1192

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ПРИ ВЛАШТУВАННІ ГВИНТОВИХ ПАЛЬ У РІЗНИХ РЕГІОНАХ УКРАЇНИ

КОКОШУЄВ О. П.¹, *асп.*,

САМЧЕНКО Р. В.^{2*}, *канд. техн. наук, доц.*,

ЮХИМЕНКО А. І.³, *канд. техн. наук, доц.*

¹ Кафедра промислового та цивільного будівництва, Запорізький національний університет, вул. Університетська, 66, 69011, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (096) 649-42-99, e-mail: a.kokoshuev@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5594-2933

^{2*} Кафедра промислового та цивільного будівництва, Запорізький національний університет, вул. Університетська, 66, 69011, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (050) 454-81-65, e-mail: sektor3@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-1013-0047

³ Кафедра промислового та цивільного будівництва, Запорізький національний університет, вул. Університетська, 66, 69011, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (095) 447-13-65, e-mail: winner.wcar@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4231-9602

Анотація. У статті представлено комплексне дослідження ефективності організаційно-технологічних рішень, пов'язаних із влаштуванням металевих гвинтових паль у різних регіонах України з урахуванням геологічної, кліматичної та техногенної специфіки територій. Основна увага зосереджена на вивченні адаптації сучасних інженерних технологій фундаментобудування до умов складного ґрунтового середовища та обмежень, які виникають при будівництві в регіонах зі зсувонебезпечними, водонасиченими, насипними або сейсмічно активними ґрунтами. Гвинтові палі розглянуто як перспективну технологію для фундаментів, яка забезпечує не лише швидке зведення конструкцій, а й мінімальний вплив на навколишнє середовище. Також, у статті окреслено основні параметри, що формують ефективність прийнятих рішень: інженерно-геологічні умови, кліматичні чинники, конструктивні характеристики паль (діаметр, довжина, антикорозійний захист тощо), організаційно-технологічні аспекти монтажу, рівень кваліфікації персоналу, вартісні показники та екологічні фактори. Регіональний аналіз охоплює умови Карпатського, Поліського, Подільського, Дніпровського, Причорноморського та Кримського регіонів. Особлива увага приділяється технічним і логістичним викликам, що виникають у процесі впровадження гвинтових паль у міських умовах, зокрема під час реконструкції об'єктів у Києві, Харкові, Дніпрі та Одесі. Наведено числові діапазони ключових конструктивних і технологічних характеристик: діаметр паль 76–133 мм, довжина 2–6 м, товщина стінки 3.5–6 мм, швидкість монтажу 15–50 паль за зміну, термін антикорозійного захисту 30–50 років. Доведено, що завдяки скороченню термінів і зменшенню вартості будівництва гвинтові палі є ефективною альтернативою традиційним фундаментам, особливо в умовах техніко-економічної доцільності та високих вимог до швидкості реалізації проектів. Зроблено висновок про необхідність подальшої стандартизації та нормативного регулювання технології з урахуванням регіональної специфіки, а також розвитку електронних інформаційно-аналітичних інструментів для обґрунтованого вибору параметрів палевих систем. Отримані результати можуть бути використані проектними, будівельними та науково-дослідними організаціями як основа для оптимізації технологій фундаментобудування в Україні.

Ключові слова: *гвинтові палі; металеві палі; інженерно-геологічні умови; фундаменти; організаційно-технологічні рішення; регіони України; ефективність; ґрунти; будівництво*

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN THE INSTALLATION OF SCREW PILES IN VARIOUS REGIONS OF UKRAINE

KOKOSHUYEV O.P.¹, *PhD Stud.*,

SAMCHENKO R.V.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

YUKHYMENKO A.I.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Industrial and Civil Engineering, Zaporizhzhia National University, 66, Universytetska St., Zaporizhzhia, 69011, Ukraine, tel. +38 (096) 649-42-99, e-mail: a.kokoshuev@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5594-2933

^{2*} Department of Industrial and Civil Engineering, Zaporizhzhia National University, 66, Universytetska St., Zaporizhzhia, 69011, Ukraine, tel. +38 (050) 454-81-65, e-mail: sektor3@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-1013-0047

³ Department of Industrial and Civil Engineering, Zaporizhzhia National University, 66, Universytetska St., Zaporizhzhia, 69011, Ukraine, tel. +38 (095) 447-13-65, e-mail: winner.wcar@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4231-9602

Abstract. The article presents a comprehensive study of the effectiveness of organizational and technological solutions related to the installation of metal screw piles in different regions of Ukraine, taking into account the geological, climatic and technogenic specifics of the territories. The main attention is focused on studying the adaptation of modern engineering technologies for foundation construction to the conditions of a complex soil environment and the limitations that arise during construction in regions with landslide-prone, water-saturated, bulk or seismically active soils. Screw piles are considered as a promising technology for foundations, which provides not only rapid construction of structures, but also minimal impact on the environment. Also, the article outlines the main parameters that shape the effectiveness of the decisions made: engineering and geological conditions, climatic factors, structural characteristics of piles (diameter, length, anti-corrosion protection, etc.), organizational and technological aspects of installation, level of personnel qualification, cost indicators and environmental factors. The regional analysis covers the conditions of the Carpathian, Polesie, Podolsk, Dnipro, Black Sea and Crimean regions. Special attention is paid to the technical and logistical challenges that arise in the process of introducing screw piles in urban conditions, in particular during the reconstruction of facilities in Kyiv, Kharkiv, Dnipro and Odessa. The numerical ranges of key structural and technological characteristics are given: pile diameter 76–133 mm, length 2–6 m, wall thickness 3.5–6 mm, installation speed 15–50 piles per shift, anti-corrosion protection period 30–50 years. It is proven that due to the reduction of terms and reduction in construction costs, screw piles are an effective alternative to traditional foundations, especially in conditions of technical and economic feasibility and high requirements for the speed of project implementation. The conclusion is made about the need for further standardization and regulatory regulation of the technology, taking into account regional specifics, as well as the development of electronic information and analytical tools for a well-founded selection of pile system parameters. The results obtained can be used by design, construction and research organizations as a basis for optimizing foundation construction technologies in Ukraine.

Keywords: *screw piles; metal piles; engineering and geological conditions; foundations; organizational and technological solutions; regions of Ukraine; efficiency; soils; construction*

Постановка проблеми. У сучасному будівництві фундамент є однією з ключових складових, що визначає надійність і довговічність об'єкта. Особливої уваги потребують фундаменти в умовах складних інженерно-геологічних умов, які характерні для багатьох регіонів України. У зв'язку з цим зростає інтерес до альтернативних типів фундаментів, зокрема металевих гвинтових паль, які завдяки своїм конструктивним особливостям дозволяють ефективно вирішувати завдання зведення споруд на слабких, насипних, водонасичених чи мерзлих ґрунтах [1].

Проте ефективність застосування гвинтових паль значною мірою залежить від організаційно-технологічних рішень, що приймаються на етапах проектування та виконання робіт. Відсутність узагальненого підходу до оцінки ефективності цих рішень у регіональному контексті створює перешкоди при масштабному впровадженні цієї технології.

Різноманітність геологічних, кліматичних і техногенних умов вимагає адаптації технологічних рішень до конкретних регіональних особливостей. Зокрема, в Карпатському регіоні переважають глинисті та піщані ґрунти з підвищеною небезпекою зсуву, тоді як у південних регіонах домінують водонасичені

ґрунти з високим рівнем ґрунтових вод. Такі відмінності визначають актуальність даного дослідження та потребують детального аналізу ефективності організаційно-технологічних рішень використання металевих гвинтових паль у різних умовах [2; 3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідженням застосування гвинтових паль у будівництві на території України присвячені праці багатьох українських і зарубіжних дослідників. Основна увага приділялась технічним характеристикам паль, методам їх розрахунку, а також практичному досвіду використання в різних інженерно-геологічних умовах [4–6].

Серед українських дослідників варто відзначити роботи В. М. Улицького, В. С. Балицького, О. М. Галінського, С. В. Романова, М. В. Корольова, В. К. Черненка, які аналізували механіку взаємодії гвинтових паль з ґрунтовим середовищем та вплив типу палі на несучу здатність. У їхніх дослідженнях було підтверджено високу ефективність металевих гвинтових паль для легких і середньозаглиблених фундаментів на слабких ґрунтах. Розглядалися питання надійності та довговічності гвинтових паль, зокрема досліджувався вплив корозійних

процесів у різних регіонах України. Зазначалось, що для забезпечення тривалої експлуатації паль необхідно застосовувати спеціальні антикорозійні покриття або використовувати палі зі сталі з підвищеною стійкістю до агресивних середовищ [6].

Дослідження зарубіжних вчених Акіо Кітамурі, Малком Болтон, Наїме Окамура зосереджуються на стандартизації технології монтажу та дослідженню довговічності металевих гвинтових систем в умовах глибокого промерзання та сезонних коливань рівня ґрунтових вод. Було розроблено типові рішення щодо гвинтових фундаментів для приватного та комерційного будівництва [4].

Окремий напрям досліджень становить аналіз впровадження гвинтових паль в умовах реконструкції старих будівель. Було підтверджено, що така технологія дозволяє значно знизити витрати часу та ресурсів без шкоди для надійності конструкції.

При цьому, на даний час, залишається недостатньо досліджений аспект комплексного аналізу ефективності організаційно-технологічних рішень саме в регіональному контексті. Більшість публікацій розглядає локальні приклади без узагальнення результатів для різних регіонів України, що актуалізує необхідність проведення подібного дослідження.

Мета статті – дослідження ефективності організаційно-технологічних рішень при влаштуванні металевих гвинтових паль у різних регіонах України з урахуванням специфіки інженерно-геологічних умов, кліматичних факторів, техногенного навантаження та рівня розвитку будівельної інфраструктури.

Виклад основного матеріалу. Україна є територією з великою геологічною та кліматичною різноманітністю, що суттєво впливає на вибір методів фундаментобудування. У зв'язку з цим металеві гвинтові палі є актуальним рішенням, здатним адаптуватися до різноманітних умов. Гвинтові палі являють собою сталеві трубчасті елементи зі спіралеподібною лопаттю на кінці, що занурюється в ґрунт за допомогою обертального руху. Вони не потребують бетонування чи витримки, можуть

монтуватися безпосередньо в ґрунт за допомогою спеціалізованого обладнання і відразу готові до експлуатації. Їх особливо ефективно використовувати в умовах водонасичених і слабких ґрунтів, на схилах та у важкодоступних місцях.

Розглянемо класифікацію регіонів України за інженерно-геологічними умовами. Гвинтові палі знайшли широке застосування у Карпатському регіоні, де переважають зсувонебезпечні ґрунти. Тут перед початком монтажу важливо враховувати геодинамічну активність територій і здійснювати ретельне обстеження ділянки. Найчастіше використовують комбіновані фундаменти, в яких гвинтові палі поєднуються з анкерними або буроін'єкційними системами для досягнення більшої стійкості.

У Поліському регіоні ґрунти здебільшого болотисті та насичені вологою, тому застосування гвинтових паль забезпечує швидке зведення фундаментів без необхідності відкачування води. Вони дозволяють встановлювати опори ліній електропередач, сонячні панелі та легкі каркасні споруди навіть у важкопрохідних умовах. Поділля характеризується наявністю чорноземів та глинистих порід, що дозволяє використовувати палі без додаткового зміцнення, а в Дніпровському регіоні актуальним є застосування гвинтових паль у реконструкції старих споруд. Тут частіше стикаються з насипними ґрунтами в умовах щільної міської забудови, тому палі стають оптимальним рішенням, що не вимагає важкої техніки та значного обсягу земляних робіт. У Причорномор'ї складність становлять солончаки та висока корозійна агресивність ґрунтів, тому тут використовують палі з антикорозійним покриттям або оцинковані конструкції.

Організаційно-технологічні аспекти є критично важливими при влаштуванні гвинтових паль. На першому етапі здійснюється ретельне геологічне обстеження майданчика, яке дозволяє визначити тип ґрунтів, рівень ґрунтових вод і потенційні ризики, зокрема зсуви чи підтоплення. Вибір типу палі, її довжини, діаметра та захисного покриття має відповідати не лише навантаженню на

фундамент, а й характеристикам конкретної ділянки. Успішне виконання робіт залежить також від якості підготовки території — необхідно вирівняти майданчик, забезпечити дренаж та, за потреби, влаштувати піщано-гравійну підготовку. Виходячи з цього, під час аналізу ефективності організаційно-

технологічних рішень щодо влаштування металевих гвинтових паль у різних регіонах України доцільно враховувати комплекс параметрів, які охоплюють інженерно-геологічні, техніко-економічні, організаційні та технологічні характеристики (табл.).

Таблиця

Основні параметри для аналізу ефективності організаційно-технологічних рішень при влаштуванні гвинтових паль

Назва характеристик	Опис параметрів
<i>Інженерно-геологічні умови</i>	Тип ґрунтів, рівень ґрунтових вод, глибина промерзання, наявність агресивного середовища.
<i>Кліматичні та регіональні умови</i>	Температурний режим, кількість опадів, сейсмічність району.
<i>Конструктивні параметри паль</i>	Діаметр, довжина, товщина стінки, тип лопаті, марка сталі, антикорозійний захист.
<i>Технологічні характеристики монтажу</i>	Тип техніки, швидкість монтажу, доступність об'єкта.
<i>Організаційні фактори</i>	Кваліфікація персоналу, логістика, наявність старих фундаментів.
<i>Економічні показники</i>	Вартість матеріалів і монтажу, тривалість циклу, обслуговування.
<i>Екологічні та соціальні аспекти</i>	Шум, вібрації, вплив на навколишнє середовище.

Наведемо допустимі діапазони числових значень, представлених параметрів у таблиці, які можуть бути використані при аналізі ефективності організаційно-технологічних рішень під час влаштування металевих гвинтових паль. Діаметр металевих гвинтових паль зазвичай коливається в межах від 76 до 133 мм, залежно від проєктного навантаження. Довжина паль найчастіше варіюється від 2 до 6 метрів, але за необхідності може бути збільшена. Товщина стінки металевої труби, яка використовується як тіло палі, становить переважно 3.5–6 мм. При монтажі контроль крутного моменту може сягати значень від 2 до 6 кНм, що дозволяє визначити досягнення несучого шару ґрунту. Продуктивність монтажу залежить від техніки та умов ділянки і становить орієнтовно від 15 до 50 паль за зміну. Глибина промерзання ґрунту в різних регіонах України становить приблизно 0.9–1.5 метра, що слід враховувати при визначенні мінімальної довжини палі. У сейсмічно активних регіонах (наприклад, Закарпаття) проєктна стійкість повинна відповідати 6–8 балам за шкалою MSK-64. Антикорозійне покриття має забезпечувати захист на термін експлуатації від 30 до 50

років, залежно від умов середовища. Вказані числові параметри становлять базову основу для порівняння варіантів рішень у конкретних умовах регіону та є базою для техніко-економічного обґрунтування вибору гвинтових паль.

Монтаж гвинтових паль виконується за допомогою мобільного або стаціонарного обладнання. У разі невеликих обсягів робіт або відсутності під'їзду застосовують ручні механізми, тоді як при зведенні великих об'єктів доцільно використовувати гідравлічні установки. Дуже важливо дотримуватись технологічних параметрів занурення: контролювати вертикальність палі, глибину її занурення, значення крутного моменту. У багатьох випадках саме нехтування цими вимогами призводить до зниження несучої здатності конструкцій або до їх деформацій у процесі експлуатації.

Не менш важливою є кваліфікація персоналу, який виконує монтаж. Працівники повинні розуміти специфіку роботи з металевими гвинтовими палями, особливості різних ґрунтів, вміти проводити візуальну та приладову перевірку встановлених елементів. Наявність системи контролю якості дозволяє на кожному етапі

будівництва гарантувати відповідність виконаних робіт проектним вимогам.

З економічного погляду, гвинтові палі дозволяють суттєво скоротити час будівництва — іноді на 40–60 % у порівнянні з традиційними монолітними або збірними фундаментами. Особливо помітною ця економія стає при зведенні малоповерхових приватних споруд, складів, тимчасових будівель або споруд енергетичної інфраструктури. В умовах реконструкції в межах щільної забудови, як у Києві, Харкові, Одесі чи Дніпрі, гвинтові палі забезпечують можливість проведення робіт без залучення великогабаритної техніки і без ризику ушкодження суміжних об'єктів.

Таким чином, комплекс організаційно-технологічних рішень у поєднанні з правильним вибором типу металевих гвинтових паль дозволяє досягати високої ефективності в різноманітних умовах України. Урахування регіональних особливостей, впровадження стандартів якості монтажу та підготовка кваліфікованого персоналу є запорукою успішного впровадження цієї технології в практику сучасного будівництва.

Висновки

Проведене дослідження підтверджує високу ефективність металевих гвинтових паль як технологічного рішення для фундаментобудування у різних регіонах України. Завдяки своїм конструктивним властивостям, ці палі демонструють універсальність і здатність до адаптації у складних інженерно-геологічних умовах, що особливо актуально в умовах великої

географічної й кліматичної різноманітності нашої країни. Використання гвинтових паль дозволяє значно скоротити терміни будівництва, зменшити вартість земляних і бетонних робіт, а також забезпечити стабільність споруд навіть на слабких або водонасичених ґрунтах.

Успішне впровадження цієї технології залежить від комплексу організаційно-технологічних рішень: від ретельного інженерно-геологічного аналізу, правильного підбору конструкції палі, до якісного виконання монтажу із дотриманням технічних параметрів. Окрему увагу слід приділяти кваліфікації персоналу, що безпосередньо впливає на якість кінцевого результату. Аналіз практики застосування металевих гвинтових паль в Україні засвідчує їхню ефективність не лише в новому будівництві, а й у реконструкції об'єктів, особливо в умовах щільної міської забудови.

У перспективі подальшого розвитку важливим є створення та вдосконалення нормативної бази, що регламентує використання гвинтових паль з урахуванням регіональних особливостей, а також запровадження сучасних цифрових інструментів, таких як електронні карти ґрунтів. Все це сприятиме підвищенню ефективності проєктування, зменшенню ризиків і розширенню сфери застосування цієї технології, включаючи об'єкти енергетичної, транспортної та соціальної інфраструктури. Отже, металеві гвинтові палі в умовах України мають всі передумови стати одним із базових інструментів сталого та ефективного розвитку будівельної галузі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bryn M. J., Afonin D. A., Bogomolova N. N. Geodetic Monitoring of Deformation of Building Surrounding an Underground Construction. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 189. Pp. 386–392.
2. Dubinchyk O., Petrenko V., Ihnatenko D., Kildieiev V. Comprehensive analysis of the retaining pile structure with the determining the stability factor by numerical methods. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 109. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900020>
3. Doubrovsky M. P., Meshcheriakov G. N. Physical modeling of sheet piles behavior to improve their numerical modeling and design. *Soils Foundations. Off. Jour. of the Japanese Geotechnical Society. Elsevier*. 2015, vol. 55, iss. 4, pp. 691–702. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003808061500075X>
4. Kowacka M., Skorupka D., Duchaczek A., Zagrodnik P. Identification of geodetic risk factors occurring at the construction project preparation stage. *Open Engineering*. 2019. Vol. 9, iss. 1. Pp. 14–17. ISSN 2391-5439. URL: <https://doi.org/10.1515/eng-2019-0002>
5. Sedin V., Volnianskyi Y., Kovba V., Bikus K., Zahilskyi V., Kowacka M., Skorupka D., Duchaczek A. & Zagrodnik P. Numerical simulation of the stress-strain state of the base of the multi-helix screw pile at its static loading under full-scale test conditions. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 267. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0120153>

6. Чуб О. А. Організаційні принципи прийняття технологічних рішень при відновленні об'єктів міського господарства. *Сучасне промислове та цивільне будівництво*. Мakiivka, 2011. Т. 7, № 2. С. 75–81.

REFERENCES

1. Bryn M.J., Afonin D.A. and Bogomolova N.N. Geodetic Monitoring of Deformation of Building Surrounding an Underground Construction. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 189, pp. 386–392.
2. Dubinchyk O., Petrenko V., Ihnatenko D. and Kildieiev V. Comprehensive analysis of the retaining pile structure with the determining the stability factor by numerical methods. *E3S Web of Conferences*. 2019, vol. 109. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900020>
3. Doubrovsky M.P. and Meshcheriakov G.N. Physical modeling of sheet piles behavior to improve their numerical modeling and design. *Soils & Foundations. Off. Jour. of the Japanese Geotechnical Society. Elsevier*, 2015, vol. 55, iss. 4, pp. 691–702. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003808061500075X>
4. Kowacka M., Skorupka D., Duchaczek A. and Zagrodnik P. Identification of geodetic risk factors occurring at the construction project preparation stage. *Open Engineering*. 2019, vol. 9, iss. 1, pp. 14–17, ISSN 2391-5439. URL: <https://doi.org/10.1515/eng-2019-0002>
5. Sedin V., Volnianskyi Y., Kovba V., Bikus K. and Zahilskyi V. Numerical simulation of the stress-strain state of the base of the multi-helix screw pile at its static loading under full-scale test conditions. *AIP Conference Proceedings*. 2019, vol. 9, iss. 1, pp. 14–17. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0120153>
6. Chub O.A. *Orhanizatsiini pryntsyipy pryiniattia tekhnolohichnykh rishen pry vidnovlenni obiektiv miskoho hospodarstva* [Organizational principles for making technological decisions when restoring municipal facilities]. *Suchasne promyslove ta tsyvilne budivnytstvo* [Modern Industrial and Civil Construction]. Makiivka, 2011, vol. 7, no. 2, pp.75–81 (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 03.09.2025.

УДК 624.012+502.15:69.003

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.73.1193

ОПТИМІЗАЦІЯ ДЕМОНТАЖУ ТА ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ У РАМКАХ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ

ЛЕВЧЕНКО Н. М.^{1*}, *д-р н. з держ. упр., проф.*,

ПОМАЗАН М. Д.², *канд. техн. наук, доц.*,

ЧЕЧЕЛЬ М. В.³, *ст. викл.*,

НЕСКОРОДОВА О. В.⁴, *зав. лаб.*,

СКАЧКОВ Р. О.⁵, *магістрант*

¹ Кафедра «Будівельне виробництво та управління проектами», Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (050) 807-85-27, e-mail: levchenkon65@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3283-6924

² Кафедра «Будівельне виробництво та управління проектами», Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (098) 856-12-07, e-mail: zdarovamax@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-0345-5118

³ Кафедра «Будівельне виробництво та управління проектами», Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (099) 619-17-77, e-mail: chechel@zp.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9462-9560

⁴ Кафедра будівельного виробництва та управління проектами, Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (098) 532-78-27, e-mail: olgabvup@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-5933-4642

⁵ Кафедра «Будівельне виробництво та управління проектами», Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (068) 475-81-65, e-mail: dobro3342@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-9085-8418

Анотація. Стрімке зростання обсягів будівництва, а також умов невизначеності сьогодення обумовлює утворення значної кількості будівельних відходів, що становлять до 30–40 % загального обсягу твердих відходів у світі [1]. Ефективний рециклінг будівельних матеріалів і продуктів знесення є передумовою сталого розвитку будівельної галузі згідно Глобальних Цілей Сталого Розвитку (ЦСР) до 2030 р. [2], оскільки сприяє збереженню ресурсів та зниженню негативного впливу на довкілля. Наукова праця спрямована на аналіз та узагальнення теоретичних засад рециклінгу будівельних матеріалів і відходів знесення, паралельно з дослідженням сучасних наукових підходів і технологій для переробки відходів і оптимізації процесів демонтажу. Проведено огляд актуальних досліджень та практичних прикладів у сфері селективного демонтажу, повторного використання ресурсів і управління будівельними відходами, узагальнено принципи циркулярної економіки в будівництві, розглянуто інноваційні механізми переробки матеріалів та оптимізаційні рішення для демонтажу з використанням сучасних технологій. Наведено практичні аспекти впровадження цих рішень та розроблена в узагальненому вигляді оцінка стратегій управління будівельними відходами. В результаті проведено узагальнення результатів дослідження та рекомендації щодо впровадження ефективних стратегій рециклінгу і демонтажу з метою мінімізації негативного екологічного впливу та підвищення економічної ефективності будівельних проектів.

Ключові слова: будівельні відходи; рециклінг матеріалів; повторне використання; зведення та демонтаж будівель; цифрові технології; сталий розвиток; оптимізація будівельних процесів

OPTIMIZATION OF DEMOLITION AND REUSE OF CONSTRUCTION MATERIALS WITHIN THE FRAMEWORK OF A CIRCULAR ECONOMY

LEVCHENKO N.M.^{1*}, *Dr. of Sc. in Public Administration, Full Professor,*

POMAZAN M.D.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,*

CHECHEL M.V.³, *Sen. Lect.,*

NESKORODOVA O.V.⁴, *Head of laboratory,*

SKACHKOV R.O.⁵, *Stud.*

^{1*} Department of Construction Production and Project Management, National University Zaporizhzhia Polytechnic, 64, Zhukovskogo St., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, +38 (050) 807-85-27, e-mail: levchenkon65@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3283-6924

² Department of Construction Production and Project Management, National University Zaporizhzhia Polytechnic, 64, Zhukovskogo St., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (098) 856-12-07, e-mail: zdarovamax@gmail.com, ORCID ID: 0009-0002-0345-5118

³ Department of Construction Production and Project Management, National University Zaporizhzhia Polytechnic, 64, Zhukovskogo St., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (099) 619-17-77, e-mail: chechel@zp.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-9462-9560

⁴ Department of Construction Production and Project Management, National University Zaporizhzhia Polytechnic, 64, Zhukovskogo St., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (098) 532-78-27, e-mail: olgabvup@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-5933-4642

⁵ Department of Construction Production and Project Management, National University Zaporizhzhia Polytechnic, 64, Zhukovskogo St., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (068) 475-81-65, e-mail: dobro3342@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-9085-8418

Abstract. Rapid growth in construction volumes, combined with the prevailing uncertainty of modern times, leads to the generation of a significant amount of construction waste, which accounts for up to 30–40 % of the total volume of solid waste worldwide [1]. Effective recycling of construction materials and demolition products is a prerequisite for the sustainable development of the construction sector in accordance with the Global Sustainable Development Goals (SDGs) for 2030 [2], as it contributes to resource conservation and the reduction of adverse environmental impacts. This scientific work is aimed at analyzing and synthesizing the theoretical foundations of recycling construction materials and demolition waste, while simultaneously investigating contemporary scientific approaches and technologies for waste processing and demolition process optimization. A comprehensive review of current research and practical examples in the fields of selective demolition, resource reuse, and construction waste management has been conducted. In doing so, the study synthesizes the principles of a circular economy in construction, examines innovative mechanisms for material recycling, and reviews optimization solutions for demolition through the use of modern technologies. Practical aspects of implementing these solutions are also discussed. As a result, the study summarizes the findings and offers recommendations for implementing effective recycling and demolition strategies. These strategies are intended to minimize negative ecological impacts and enhance the economic efficiency of construction projects.

Keywords: *construction waste; material recycling; reuse; building construction and demolition; digital technologies; sustainable development; optimization of construction processes*

Вступ. Одним із найбільших «генераторів» твердих відходів сьогодення є будівельна сфера: щорічно у світі утворюється понад 10 мільярдів тонн відходів будівництва та знесення [1]. За оцінками дослідників, до 30–40 % загального обсягу твердих відходів припадає саме на будівництво і демонтаж будівель. У країнах ЄС будівельний сектор забезпечує понад 35 % сумарного утворення відходів та до 5–12 % національних викидів парникових газів [3]. Неналежне поводження з будівельними відходами може спричинити серйозні екологічні проблеми – захоронення великого обсягу матеріалів призводить до втрати цінних ресурсів, забруднення ґрунтів, води і повітря, а також створює ризики для здоров'я людини [4]. В свою чергу, питання виробництва нових будівельних матеріалів потребує значної кількості природних ресурсів і енергії, що свідчить про необхідність впровадження ефективних практик рециклінгу та повторного використання матеріалів як нагальну потребу для забезпечення екологічної безпеки та ресурсоефективності будівництва. Світове співтовариство

усвідомлює цю проблему та рухається в напрямі циркулярної економіки в будівництві. Згідно ієрархії поводження з відходами ЄС, пріоритетними є запобігання утворенню відходів і повторне використання матеріалів, а переробка і утилізація – наступні кроки. Відповідно до ВРД ЄС 2008/98/ЕС, поставлено ціль до 2030–2035 р. на повторну переробку відходів, котра має бути на рівні 60–65 % за загальною вагою.

Метою цієї статті є аналіз теоретичних основ та сучасних технологій рециклінгу будівельних матеріалів і продуктів знесення, рекомендацій щодо оптимізації процесів демонтажу та вторинного використання матеріалів. Наукова новизна полягає у комплексному аналізі інноваційних технологій (від традиційного дроблення до застосування IoT технологій) в контексті концепції сталого будівництва.

Методологія дослідження. Для досягнення мети проведено огляд наукової літератури і практичних кейсів, систематизовано механічні, хімічні та цифрові підходи до переробки будівельних відходів. Використано методи аналізу і синтезу літературних джерел, порівняння

технологічних рішень та системний підхід до оцінки життєвого циклу матеріалів з наданням подальших рекомендацій.

Стан проблеми та цілі дослідження. Численні дослідники приділяють увагу порівнянню підходів до демонтажу. В роботі [5] Pantini та співавтори застосували методологію оцінки життєвого циклу для критичного порівняння вибіркового (селективного) демонтажу із традиційним знесенням. Проаналізовано демонтаж житлової будівлі в Італії з врахуванням фактичних даних підрядників, і визначено ключові фактори, що впливають на екологічний баланс проекту демонтажу. Результати показали, що екологічна доцільність селективного демонтажу суттєво залежить від характеристик самої будівлі та розвитку місцевого ринку вторинних матеріалів. Висновок авторів – екологічну сталість селективного демонтажу слід оцінювати в кожному випадку окремо, оскільки в одних сценаріях він дає екологічний ефект, а в інших додаткові впливи (наприклад, від використання спеціалізованої техніки) можуть переважити користь.

Альтернативою до одновимірних оцінок є багатокритеріальні моделі, що враховують не лише екологічні, а й економічні та соціальні ефекти рециклінгу будівельних матеріалів. Прикладом є дослідження Han Zhang та ін. [6], де запропоновано застосування концепції «тиск – стан – відгук» (Pressure – State – Response, PSR) для всебічної оцінки сталих сценаріїв управління. У рамках цієї роботи розроблено модель, яка інтегрує екологічні показники (зменшення викидів, економію ресурсів), економічні критерії (співвідношення витрат) та соціальні фактори, що дозволяє аналізувати результати впровадження різних стратегій переробки. Модель апробована на даних про поводження з відходами будівництва в місті Чунцін (Китай), де проаналізовано наявний стан управління відходами, співвідношення попиту і пропозиції вторинних матеріалів та ефективність галузі.

Окремим напрямом наукових пошуків є максимізація повторного використання будівельних компонентів (reuse) при демонтажі, що дозволяє скоротити потребу у виробництві нових матеріалів. У галузі конструктивних систем це набуває форми концепції design for deconstruction – проектування будівель із розрахунком на їхній розбір і повторне застосування елементів. Показовою є робота Brütting, Jan Friedrich Georg [7], де запропоновано оптимізаційний підхід до проектування сталевих каркасних конструкцій із використанням наявного складу демонтованих елементів, поєднуючи математичну оптимізацію із оцінкою життєвого циклу конструкції. Розрахунки для декількох типових інженерних конструкцій (ферм, каркасів будівель) показали, що рішення, спроектовані з повторно використаних сталевих балок, можуть мати до 60 % менший сумарний вплив на довкілля у порівнянні з оптимізованими конструкціями, виготовленими з нової (навіть переробленої) сталі.

Сучасні інформаційні моделі будівель (BIM) і суміжні технології розглядаються як перспективний засіб підвищення ефективності управління матеріальними потоками протягом життєвого циклу будівлі. Bahareh Nikmehr і співавтори в дослідженні [8] представили огляд останніх досягнень у застосуванні BIM-технологій для управління C&DW на різних стадіях проекту. Їхній scoring review охопив понад 300 наукових публікацій і виявив, що існуючі BIM-орієнтовані рішення зосереджені переважно на стадіях проектування та будівництва, тоді як фаза демонтажу та утилізації досі отримала недостатньо уваги. Іншими словами, наразі бракує комплексних цифрових інструментів, які б забезпечували «наскрізне» управління будівельними матеріалами від проектування до кінця життєвого циклу. Науковці відзначають, що більшість доступних BIM-модулів для поводження з відходами не інтегрують дані між стадіями та часто не враховують результати після будівництва, а також мають

слабку теоретичну обґрунтованість алгоритмів оптимізації потоків відходів. Таким чином, хоча ВІМ широко впроваджено для оптимізації дизайну та будівництва, його потенціал у плануванні демонтажу (наприклад, для проведення попереднього аудиту матеріалів, відстеження ресурсів, планування логістики розбирання) реалізований частково.

У статті вітчизняних науковців Левченко Н. М., Назаренко О. М. та ін. [9] розглядається підхід до управління будівельними відходами через призму економіки замкнутого циклу, що передбачає максимальну утилізацію та повторне використання будівельних матеріалів. Автори акцентують увагу на автоматизованих системах сортування, цифрових технологіях та нормативно-правових механізмах як ключових факторах ефективного рециклінгу. Увагу приділено економічним стимулам (податковим пільгам, «зеленим» закупівлям), які можуть сприяти зменшенню будівельних відходів та розвитку ринку вторинних матеріалів. Зроблено висновок, що системний підхід до управління відходами є критично важливим для зниження екологічного навантаження та забезпечення стійкості будівельної галузі.

Отже, тематика дослідження є актуальною, оскільки виникає потреба у комплексніших підходах, які одночасно оцінюють екологічні вигоди та витрати, що підтверджується іншими дослідженнями (наприклад, поєднанням LCA з аналізом життєвих витрат – LCC – для вибору оптимальної стратегії управління відходами). Проблема рециклінгу будівельних матеріалів та оптимізації демонтажу є надзвичайно актуальною через зростаючі обсяги будівельних відходів, необхідність відновлення міст, обмеженість природних ресурсів та необхідність впровадження циркулярної економіки.

Виклад основного матеріалу. Повторне використання і переробка будівельних матеріалів є складовою концепції сталого розвитку будівельної галузі. Теоретичною основою є циркулярна економіка, яка передбачає повернення ресурсів у

виробничий цикл та мінімізацію відходів. На відміну від лінійної моделі «виробництво – використання – утилізація», циркулярний підхід спрямований на замкнений цикл матеріалів, де будівельні відходи розглядаються як вторинна сировина для нових ресурсів. У будівництві це означає, що матеріали споруди в кінці її життєвого циклу не повинні перетворюватися на сміття, а мають повернутися у вигляді корисних ресурсів. Подібний системний підхід розглядає процеси демонтажу та переробки як частину життєвого циклу будівлі, інтегровану з етапами зведення і експлуатації. Методологічно необхідно враховувати екологічні пріоритети (мінімізація впливу на довкілля), економічну ефективність та впровадження інновацій при плануванні робіт з демонтажу і рециклінгу.

Теоретичні дослідження [3–9] підтверджують, що рециклінг будівельних матеріалів має суттєві переваги для довкілля. Завдяки повторному використанню ресурсів зменшується потреба у видобутку первинної сировини (піску, щебню, деревини тощо), скорочуються енерговитрати на виробництво нових матеріалів, а обсяг відходів, що направляються на полігони, істотно знижується. Переробка матеріалів також пов'язана зі зменшенням викидів парникових газів: скорочення виробництва цементу шляхом заміни його частки вторинними мінеральними добавками веде до зниження викидів CO₂, оскільки виробництво клінкеру є енергоємним та вуглецеємним процесом. Економічно рециклінг може бути вигідним за рахунок скорочення витрат на видалення сміття і придбання нових матеріалів.

Міжнародний досвід свідчить, що встановлення цільових показників і стандартів утилізації відходів сприяє розвитку інфраструктури переробки. Окрім згаданих директив ЄС щодо 60–70 % рециклінгу, багато країн впроваджують будівельні стандарти, які вимагають проектувати будівлі з урахуванням можливості демонтажу і вторинного використання матеріалів (концепція Design for Deconstruction) [10]. Теоретично це

підкріплюється поняттям “будівельний паспорт”, що містить інформацію про всі

матеріали будівлі та їх придатність до повторного застосування.

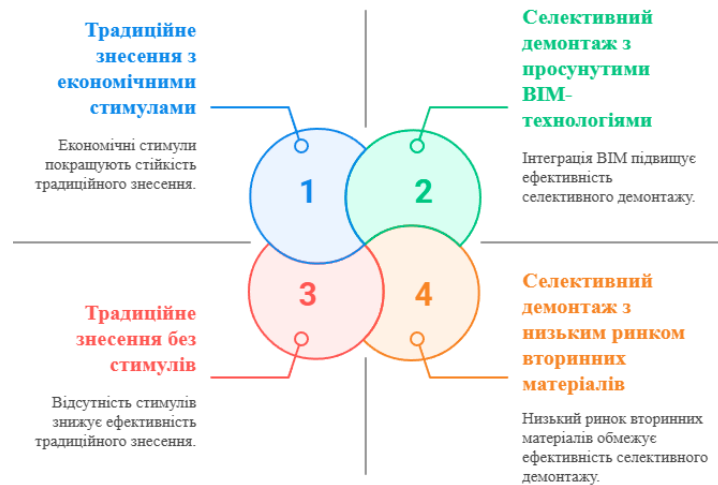


Рис. 1. Комплексна оцінка стратегій управління будівельними відходами

Таким чином, на основі теоретичних положень циркулярної економіки, принципів екологічної раціональності та системного підходу до життєвого циклу будівлі, була розроблена методологія комплексної оцінки стратегій управління будівельними відходами, що враховує як технологічні, так і економічні аспекти вибору демонтажних рішень. На рисунку 1 представлено типологізацію можливих стратегій з урахуванням рівня технологічної інтеграції та наявності економічних стимулів, що дозволяє оцінити потенціал кожної стратегії з точки зору ефективності поводження з відходами.

У поєднанні з інформаційним моделюванням такі підходи дозволяють ще на стадії проектування передбачити сценарії кінця життєвого циклу будівлі. У результаті, нормативні вимоги спонукають учасників ринку до впровадження циркулярних рішень, а також створюють попит на інновації у сфері рециклінгу будівельних відходів.

Отже, теоретичні засади рециклінгу будівельних матеріалів базуються на принципах циркулярної економіки, екологізації будівництва та системного підходу до життєвого циклу будівель. Вони підкріплені економічними розрахунками вигідності вторинного використання та нормативними вимогами, що задають

орієнтири для практичної реалізації цих процесів.

Сучасний рівень розвитку технологій відкриває широкі можливості для ефективної переробки будівельних відходів. Існує комплекс підходів до переробки – від традиційних механічних методів до хімічних технологій та впровадження цифрових рішень, які автоматизують і оптимізують процес.

Механічна переробка є найпоширенішим методом утилізації будівельних відходів, що охоплює комплекс операцій – від дроблення великих фрагментів конструктивних елементів до їх подрібнення, сортування та очищення з метою перетворення матеріалів у вторинну сировину, придатну для повторного використання. За допомогою спеціалізованих дробарок здійснюється дроблення масивних фрагментів залізобетону, бетону та цегли у дрібні фракції, такі як щебінь, гравій або піщано-гравійна суміш, що використовуються як заповнювачі у виробництві нового бетону або як основа для дорожніх покриттів.

Подальше сортування, яке може проводитися як вручну, так і за допомогою автоматизованих ліній з використанням грохотів, сит та сенсорних систем, дозволяє розділити суміш відходів на окремі потоки – бетон, цеглу, метал, деревину, скло та пластик, причому очищення від домішок за

допомогою магнітних або повітряних сепараторів значно покращує якість отриманої вторинної сировини. Специфічні механічні технології передбачають, що металеві компоненти надалі відправляються на переплавку, деревину – повторно використовуються або дробляться для виробництва деревостружкових плит, скло – переплавляється або застосовується як теплоізоляційний матеріал, а асфальтобетон переробляється у матеріал, що дозволяє знизити споживання первинного бітуму.

Використання мобільних рециклінгових комплексів, здатних обробляти відходи безпосередньо на будівельному майданчику, сприяє оптимізації логістики перевезення матеріалів до стаціонарних переробних підприємств, що зменшує транспортні витрати та екологічне навантаження, забезпечуючи тим самим ефективно впровадження циркулярних підходів у будівництві. Хімічні та термічні технології рециклінгу забезпечують глибшу обробку будівельних відходів, які важко переробити виключно механічними методами, і сприяють покращенню характеристик отриманих вторинних матеріалів. Один із підходів полягає в активації дробленого бетону: додаткове тонке подрібнення у поєднанні з хімічною обробкою слабкими кислотними або лужними розчинами дозволяє видалити залишки цементного каменю, очистити поверхню щебеню та підвищити його адгезивні властивості, що забезпечує кращу міцність нових бетонних сумішей. Інший напрямок – термічна активація, яка передбачає випалювання бетонного бою при температурах у діапазоні 500–700°C, що призводить до розкладу гідратованих цементних фаз та утворення активного порошку, здатного частково замінити портландцемент у виробництві нового бетону. Крім того, хімічні методи дозволяють інтегрувати будівельні відходи у виробництво новітніх матеріалів, таких як геополімерні цементы, що характеризуються високою міцністю та зниженим вуглецевим

слідом. Особливо важливою є також переробка полімерних та небезпечних компонентів, де застосовують методи термічного розкладання (піроліз) для отримання базових нафтохімічних продуктів, а спеціальні технології дозволяють перетворити азбест та бітумні матеріали на безпечні та придатні для повторного використання продукти.

Цифрові та інноваційні технології відіграють ключову роль у сучасному управлінні будівельними відходами та оптимізації процесів демонтажу. Сучасні системи інформаційного моделювання, такі як BIM, дозволяють створити детальний цифровий паспорт будівлі з даними про її матеріальний склад, що дає можливість ще на стадії проектування розробити стратегію демонтажу з максимальним збереженням придатних елементів. Інтеграція мережі датчиків і систем Інтернету речей забезпечує моніторинг стану відходів у режимі реального часу, оптимізує логістику перевезень та мінімізує транспортні витрати. Сучасні алгоритми штучного інтелекту сприяють автоматизованому сортуванню змішаних відходів, дозволяючи з високою точністю класифікувати матеріали за фракціями та підвищувати ефективність переробки. Такі технології, поряд із застосуванням блокчейн-систем для прозорості інформаційних потоків, сприяють розвитку циркулярної економіки в будівництві, забезпечуючи комплексний підхід до управління матеріальними ресурсами від етапу проектування до кінця життєвого циклу будівлі. У якості аналізу була створена таблиця з виявленням недоліків та переваг наведених методів переробки будівельних матеріалів (табл.).

Згідно таблиці, ефективна реалізація повторного використання потребує комплексного підходу, який поєднує механічні, хімічні, термічні та цифрові технології для забезпечення високої якості вторинної сировини, оптимізації виробничих процесів та мінімізації екологічного впливу.

Таблиця

Узагальнення методів повторного використання будівельних матеріалів

Методологія	Опис	Переваги	Недоліки/Обмеження	Сфера застосування
Механічна переробка	Дроблення, подрібнення, сортування та очищення будівельних відходів з метою отримання вторинної сировини.	Простота технології, значне зменшення об'єму відходів, широко застосовується.	Обмежена якість отриманої сировини, потреба у додатковому сортуванні та очищенні.	Рециклінг бетону, цегли, металу, деревини, скла.
Хімічна або термічна активація	Активація дробленого бетону через хімічну обробку та/або випалювання (термічна активація) для отримання активного порошку, який підвищує властивості матеріалу.	Покращення адгезії та міцності вторинних сумішей, підвищення якості сировини для нових бетонних виробів.	Висока енерговитратність, складність технологічного процесу, потреба у спеціалізованих умовах.	Виробництво нового бетону із частковою заміною портландцементу.
Перетворення відходів на нові матеріали	Використання дрібнодисперсних мінеральних залишків для виробництва геополімерних цементів та інших інноваційних матеріалів.	Зниження вуглецевого сліду, максимальне використання відходів, створення нових матеріалів	Потребує спеціалізованих реагентів та технологій, складність масштабування процесу.	Будівельні блоки, панелі, фундаментні конструкції.
Рециклінг полімерних і небезпечних матеріалів	Застосування технологій піролізу для термічного розкладу пластикових відходів, а також спеціальних методів утилізації азбесту та бітумних матеріалів.	Отримання нафтохімічних продуктів, утилізація небезпечних компонентів, повернення базових хімічних компонентів	Висока енерговитратність, технологічна складність, потреба у строгому контролі процесів.	Отримання базових компонентів для нових матеріалів, утилізація небезпечних відходів.
Комплексні термохімічні процеси	Плазмова переробка, що включає газифікацію будівельних відходів при надвисоких температурах з утворенням синтез-газу та інертного шлаку.	Повна деструкція домішок, універсальність для змішаних відходів, можливість обробки небезпечних компонентів.	Дуже висока енерговитратність, висока вартість, обмежене застосування через складність обладнання.	Переробка змішаних та спеціалізованих (небезпечних) відходів.

Управління демонтажем будівель на сучасному етапі має починатись з ретельного обстеження споруди із застосуванням сучасних технологій, таких як 3D-сканування, лазерна діагностика, дрони та IoT-системи [11]. Завдяки отриманій точній цифровій моделі будівлі визначається її технічний стан, можливість повторного використання різних елементів (несучих конструкцій, облицювальних матеріалів,

інженерного обладнання) та виявляються потенційно небезпечні компоненти (азбест, свинець у фарбі, цвіль).

Вибір методу демонтажу є критичним – механізований демонтаж із застосуванням важкої техніки забезпечує оперативність, але зазвичай генерує змішаний уламковий матеріал, що ускладнює подальше сортування. Селективний демонтаж (деконструкція) дозволяє поступово

розібрати будівлю, зберігаючи цілі компоненти для повторного використання або переплавлення, хоча потребує більше часу і ресурсів.

Сучасні цифрові технології в перспективі мають можливість інтегрувати дані з різних стадій життєвого циклу будівлі – від проектування до демонтажу – забезпечуючи прозорість і контроль за матеріальними потоками. Комплексний підхід дозволяє не лише оптимізувати процес демонтажу та повторного використання матеріалів, а й стимулює розвиток циркулярної економіки в будівництві, сприяючи екологічній та економічній стійкості галузі, цифровізації будівництва.

Висновки

У даній статті розглянута інтегральна концепція сталого управління будівельними відходами, яка охоплює всі стадії життєвого циклу споруди – від етапу проектування, через демонтаж, до переробки та повторного використання матеріалів. В результаті аналізу були охоплені сучасні механічні, хімічні (у тому числі термічні) та цифрові підходи, завдяки яким можна не лише мінімізувати об'єми відходів, а й покращити їх якість як вторинної сировини для подальшого застосування. В перспективі подальших наукових досліджень наявне використання ВІМ та алгоритмів ШІ дає можливість створити цифрові моделі будівель, що сприяють визначенню оптимальних сценаріїв демонтажу та повторного використання елементів вже на ранніх стадіях проектування. У практичному контексті дослідження теоретичних підходів, так і реальних кейсів. Зроблено висновок, що комплексний підхід – злиття технологічних інновацій, традиційних методів переробки та системного планування – є ключовим

чинником у досягненні стійкого розвитку будівельної галузі. Запропонована методологія комплексної оцінки стратегій управління будівельними відходами створює основу для впровадження інновацій, оптимізації логістики демонтажу та переробки матеріалів, що в свою чергу сприяє ефективному використанню ресурсів, збереженню навколишнього середовища та розвитку циркулярної економіки.

Обов'язковим етапом реалізації запропонованих стратегій є їх адаптація на муніципальному рівні. Співпраця між місцевою владою, роботодавцями, бізнес-сектором та громадськими організаціями створює сприятливе середовище для формування інфраструктури з переробки та демонтажу. Впровадження економічних стимулів, таких як податкові пільги та «зелені» закупівлі, а також розробка відповідних нормативно-правових механізмів сприятимуть впровадженню інтегрованих підходів та забезпечать умови для сталого розвитку регіонів.

Підсумовуючи, отримані результати дозволяють розглядати інтегровані технологічні рішення як базу для трансформації будівельної галузі з орієнтацією на цілісний екологічний, соціально-економічний та інституційний підхід. Проведене дослідження обґрунтовує ефективність міждисциплінарного підходу до реалізації циркулярних стратегій, який не лише сприяє збереженню природних ресурсів, але й стимулює економічний розвиток та підвищує соціальну згуртованість на рівні місцевих громад. Реалізація цієї системи потребує послідовної інтеграції зусиль на рівні місцевих органів влади, бізнесу та суспільства, що стане запорукою сталого трансформаційного процесу у будівельній сфері.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Islam N., Sandanayake M., Muthukumaran S., Navaratna D. Review on Sustainable Construction and Demolition Waste Management – Challenges and Research Prospects. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, № 8. P. 3289. DOI: 10.3390/su16083289.
2. Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року : Указ Президента України від 30.09.2019 № 722/2019. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text> (дата звернення: 14.02.2025).
3. Skanche M. 70 % of construction and demolition waste shall be re-used or recycled by 2020. Loopfront Blog. 23.03.2020. URL: <https://blog.loopfront.com/blog/70-of-construction-and-demolition-waste-shall-be-re-used-or-recycled-by-2020> (дата звернення: 17.02.2025).

4. Menegaki M., Damigos D. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2018. Vol. 13. Pp. 8–15.
5. Pantini S. et al. Is selective demolition always a sustainable choice? *Waste Management*. 2020. Vol. 103. Pp. 169–176. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.12.033.
6. Zhang H. et al. Integrated Benefits of Sustainable Utilization of Construction and Demolition Waste in a Pressure-State-Response Framework. *Sustainability*. 2023. Vol. 16, № 19. P. 8459. DOI: 10.3390/su16198459.
7. Brütting J. F. G. Optimum design of low environmental impact structures through component reuse : Doctoral Thesis. EPFL, Switzerland. 2020. DOI: 10.5075/epfl-thesis-8448.
8. Nikmehr B. et al. BIM-Based Tools for Managing Construction and Demolition Waste (CDW) : a scoping review. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, № 15. P. 8427. DOI: 10.3390/su13158427.
9. Левченко Н. М., Назаренко О. М., Березовська А. О., Белоусова П. В., Щемелев М. В., Гаджівердієв А. А. Інноваційні технології в управлінні будівельними відходами згідно економіки замкнутого циклу. *Науковий вісник будівництва*. 2024. № 110. С. 78–85. DOI: 10.33042/2311-7257.2024.110.1.9.
10. Derikvand M., Fink G. Design for Deconstruction : Benefits, Challenges, and Outlook for Timber – Concrete Composite Floors. *Buildings*. 2023. Vol. 13, № 7. P. 1754. DOI: 10.3390/buildings13071754.
11. Rustamov A., Gasanov A., Azizullayev M. G. Analysis of modules and systems used in effective control of UAVS in radio electronic combat environment. 2024. DOI: 10.13140/RG.2.2.25339.12326.

REFERENCES

1. Islam N., Sandanayake M., Muthukumaran S. and Navaratna D. Review on Sustainable Construction and Demolition Waste Management – Challenges and Research Prospects. *Sustainability*. 2024, vol. 16, no. 8, p. 3289. DOI: 10.3390/su16083289.
2. *Pro Tsily stalogo rozvytku Ukrayiny na period do 2030 roku : Ukaz Prezydenta Ukrayiny vid 30.09.2019 № 722/2019* [On the Sustainable Development Goals of Ukraine for the period until 2030 : Decree of the President of Ukraine dated September 30, 2019 No. 722/2019]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text> (accessed on: February 14, 2025). (in Ukrainian).
3. Skanche M. 70 % of construction and demolition waste shall be re-used or recycled by 2020. Loopfront Blog. 23.03.2020. URL: <https://blog.loopfront.com/blog/70-of-construction-and-demolition-waste-shall-be-re-used-or-recycled-by-2> (accessed on: 17.02.2025).
4. Menegaki M. and Damigos D. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2018, vol. 13, pp. 8–15.
5. Pantini S. et al. Is selective demolition always a sustainable choice? *Waste Management*. 2020, vol. 103, pp. 169–176. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.12.033.
6. Zhang H. et al. Integrated Benefits of Sustainable Utilization of Construction and Demolition Waste in a Pressure-State-Response Framework. *Sustainability*. 2023, vol. 16, no. 19, p. 8459. DOI: 10.3390/su16198459.
7. Brütting J.F.G. Optimum design of low environmental impact structures through component reuse : Doctoral Thesis. EPFL, Switzerland, 2020. DOI: 10.5075/epfl-thesis-8448.
8. Nikmehr B. et al. BIM-Based Tools for Managing Construction and Demolition Waste (CDW) : a scoping review. *Sustainability*. 2021, vol. 13, no. 15, p. 8427. DOI: 10.3390/su13158427.
9. Levchenko N.M., Nazarenko O.M., Berezovska A.O., Bilosova P.V., Shchemelev M.V. and Hadzhiverdiyev A.A. *Innovatsiyni tekhnolohiyi v upravlinni budivel'nyh vidkhodamy zhidno ekonomiky zamknutogo tsyклу* [Innovative technologies in construction waste management according to the closed-loop economy]. *Naukovyy visnyk budivnytstva* [Scientific Bulletin of Construction]. 2024, no. 110, pp. 78–85. DOI: 10.33042/2311-7257.2024.110.1.9. (in Ukrainian).
10. Derikvand M. and Fink G. Design for Deconstruction : Benefits, Challenges, and Outlook for Timber – Concrete Composite Floors. *Buildings*. 2023, vol. 13, no. 7, p. 1754. DOI: 10.3390/buildings13071754.
11. Rustamov A., Gasanov A. and Azizullayev M.G. Analysis of modules and systems used in effective control of UAVS in radio electronic combat environment. 2024. DOI: 10.13140/RG.2.2.25339.12326.

Надійшла до редакції: 11.09.2025.

УДК 69.003

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.82.1194

СУЧАСНІ ЦИФРОВІ ПІДХОДИ ДО ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗВЕДЕННЯ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД

МИХАЙЛИК Д. В.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 (097) 733-48-08, e-mail: dima.mykhailyk@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-3951-2763

^{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.ihor@pdaba.edu.ua; sokolov.ihor@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8366-4301

Анотація. Постановка проблеми. У статті розглядаються актуальні питання удосконалення науково-методичних основ формування організаційно-технологічних рішень будівництва споруд із використанням сучасного інформаційного забезпечення. В умовах динамічного розвитку будівельної галузі та зростання вимог до якості, термінів і вартості виконання проєктів, ефективні організаційно-технологічні рішення стають критичним фактором успіху. Традиційні підходи до управління будівельними процесами часто не відповідають сучасним вимогам і можливостям, що обмежує потенціал будівельних підприємств у досягненні стратегічних цілей. Використання сучасного інформаційного забезпечення, такого як системи BIM (Building Information Modeling), автоматизовані системи управління будівельними процесами та цифрові платформи, дозволяє значно підвищити ефективність планування, контролю та реалізації будівельних проєктів. **Мета дослідження.** Стаття спрямована на розвиток науково-методичних підходів до формування організаційно-технологічних рішень у будівництві, що ґрунтуються на інтеграції сучасних інформаційних технологій. Дослідження передбачає розробку ефективних моделей управління будівельними процесами, оптимізацію ресурсного планування, а також впровадження інноваційних методів моніторингу та контролю будівельних робіт. Особлива увага приділяється застосуванню технологій віртуального моделювання, аналізу даних у реальному часі та інтеграції різних систем управління у єдину цифрову екосистему будівельного проєкту. **Методологія.** Для досягнення поставлених завдань використовуються методи системного аналізу, математичного моделювання будівельних процесів, а також методи експертного оцінювання. Проведено аналіз існуючих організаційно-технологічних рішень із застосуванням сучасних інформаційних систем, а також досліджено їх вплив на ефективність будівельного виробництва. Важливе місце у дослідженні займає вивчення реальних кейсів успішного впровадження інформаційних технологій у будівельні проєкти. **Висновки.** Результати дослідження демонструють значний потенціал удосконалення організаційно-технологічних рішень завдяки впровадженню сучасних інформаційних технологій. Запропоновані методи та підходи дозволяють знизити витрати ресурсів, скоротити терміни будівництва та підвищити якість виконання робіт. Стаття робить вагомий внесок у розвиток наукових підходів до управління будівельними процесами та пропонує практичні рекомендації для їх впровадження на рівні підприємств і проєктів.

Ключові слова: організаційно-технологічні рішення; будівництво; інформаційне забезпечення; BIM; оптимізація; цифрові технології

MODERN DIGITAL APPROACHES TO ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SUPPORT FOR THE CONSTRUCTION OF BUILDINGS AND STRUCTURES

MYKHAILYK D.V.¹, Postgrad. Stud.,

SOKOLOV I.A.^{2*}, Dr. Sc. (Tech.), Prof.

¹ Department of Organization 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 (097) 733-48-08, e-mail: dima.mykhailyk@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-3951-2763

^{2*} Department of Organization 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.ihor@pdaba.edu.ua; sokolov.ihor@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8366-4301

Abstract. Problem statement. The article addresses current issues in improving the scientific and methodological foundations for developing organizational and technological solutions in construction projects using modern information technologies. In the context of the dynamic development of the construction industry and increasing demands for quality, deadlines, and project costs, effective organizational and technological solutions are becoming a critical success factor. Traditional approaches to managing construction processes often fail to meet modern requirements and capabilities, limiting the potential of construction enterprises in achieving strategic goals. The use of modern information technologies, such as Building Information Modeling (BIM) systems, automated construction process management systems, and digital platforms, significantly enhances the efficiency of planning, monitoring, and implementing construction projects. **The purpose of this study.** The article focuses on developing scientific and methodological approaches to forming organizational and technological solutions in construction, based on integrating modern information technologies. The research involves developing effective models for managing construction processes, optimizing resource planning, and implementing innovative monitoring and control methods. Special attention is paid to applying virtual modeling technologies, real-time data analysis, and integrating various management systems into a unified digital ecosystem for construction projects. **Methodology.** To achieve the stated objectives, methods of systems analysis, mathematical modeling of construction processes, and expert evaluation methods are employed. The study analyzes existing organizational and technological solutions utilizing modern information systems and examines their impact on construction efficiency. A significant part of the research focuses on studying real case studies of successful implementations of information technologies in construction projects. **Conclusions.** The research results demonstrate the significant potential for improving organizational and technological solutions through the adoption of modern information technologies. The proposed methods and approaches reduce resource costs, shorten construction timelines, and improve work quality. The article makes an important contribution to developing scientific approaches to managing construction processes and offers practical recommendations for implementation at both enterprise and project levels.

Keywords: *organizational and technological solutions; construction; information technologies; BIM; optimization; digital technologies*

Постановка проблеми. У сучасних умовах повномасштабної війни в Україні та необхідності швидкої післявоєнної відбудови гостро постає потреба в удосконаленні науково-методичних засад формування організаційно-технологічних рішень у будівництві. Масштабні руйнування інфраструктури, обмежені ресурси, складна логістика та вимоги до оперативного і якісного виконання робіт зумовлюють необхідність нових підходів до управління будівельними проектами.

Традиційні методи організації та планування будівництва виявилися малоефективними в умовах високої динаміки, нестабільності та необхідності пришвидшеного темпу реалізації проектів. Однією з ключових проблем залишається недостатнє впровадження сучасних цифрових технологій, таких як BIM, платформи управління ресурсами, аналітичні інструменти для прогнозування ризиків, що призводить до неузгодженості між учасниками проєкту, помилок у плануванні та втрати часу і ресурсів.

Координація між етапами будівельного процесу часто є фрагментованою, що спричиняє затримки, перевитрати та неефективне використання матеріалів. Особливо це відчутно у відбудовчих проєктах, де важливо швидко адаптуватися до змін і забезпечити гнучке управління даними та процесами.

Для подолання цих викликів необхідно розробити науково обґрунтовані методичні підходи, що передбачають комплексну цифровізацію будівельної галузі, інтеграцію інноваційних технологій, підвищення рівня комунікації між учасниками та створення ефективних інструментів оперативного прийняття рішень. Це дозволить забезпечити якісне та стійке відновлення інфраструктури України.

Мета дослідження. Метою цієї статті є аналіз поточного стану організаційно-технологічних процесів у будівництві, оцінка існуючих методів управління логістикою та ресурсами, а також виявлення основних проблем і викликів. Особлива увага приділяється впровадженню інноваційних

технологій, таких як IoT, автоматизоване управління запасами та штучний інтелект (AI) для прогнозування потреб у матеріалах. Мета полягає у розробці ефективних підходів, що забезпечать оптимізацію процесів планування, підвищення ефективності, скорочення витрат і термінів реалізації будівельних проєктів, а також у створенні конкретних рекомендацій для успішного впровадження сучасних інформаційних технологій у будівельній галузі.

Аналіз публікацій. Було розглянуте дослідження науковцями з Німеччини, зосереджене на систематичному аналізі інтеграції технологій доповненої (AR) та віртуальної реальності (VR) з інформаційним моделюванням будівель (BIM) у різних фазах життєвого циклу будівельних об'єктів: дизайні, будівництві та експлуатації [1]. Методологія дослідження включала систематичний огляд літератури з використанням бази даних Scopus, де за ключовими словами, пов'язаними з BIM, AR та VR, було відібрано 32 релевантні публікації з 447 за період 2017–2022 років. Класифікація проводилася за фазами життєвого циклу будівель, типами пристроїв і конкретними випадками використання. Автори визначили п'ять основних категорій застосування AR/VR у BIM: планування, огляд і забезпечення якості, керівництво завданнями, безпека та навчання [1]. Було встановлено, що VR переважає у фазі дизайну, де використовується для архітектурних оглядів і інтер'єрного моделювання, тоді як AR домінує у фазах будівництва та експлуатації, де він забезпечує контроль за якістю, керівництво завданнями та технічне обслуговування. Дослідження також виявило проблеми з точністю трекінгу AR на будівельних майданчиках та потенційні ризики, пов'язані з кібербезпекою VR-рішень. Найбільша увага у розглянутих роботах приділяється будівельному етапу, де AR активно використовується для перевірки відповідності проєктним вимогам, моніторингу прогресу будівництва та підтримки виконання конкретних завдань

[1]. У фазі експлуатації AR демонструє ефективність у навігації на об'єктах та у процесах технічного обслуговування, дозволяючи знаходити несправності та надавати покрокові інструкції для їх усунення. Автори наголошують, що майбутні дослідження повинні зосередитися на поглибленому вивченні фази експлуатації, інтеграції AR/VR із технологіями Інтернету речей (IoT), підвищенні точності трекінгу AR для роботи на будівельних майданчиках та на проведенні прямого порівняння ефективності AR і VR у різних випадках використання [1].

У статті «Examining the Position of Building Information Modeling (BIM) Technology in Different Dimensions of Building Smartness» автори досліджують вплив технології інформаційного моделювання будівель (BIM) на різні аспекти інтелектуального будівництва, управління ризиками, підвищення безпеки та зниження енергоспоживання в будівельних проєктах [2]. Основною метою дослідження є аналіз ролі BIM у підвищенні ефективності будівельних процесів шляхом інтеграції сучасних технологій управління даними, візуалізації та моделювання. Дослідження базується на комбінованому підході, що включає системний аналіз, огляд існуючих методів впровадження BIM, а також моделювання сценаріїв для оцінки ефективності BIM у ключових напрямках будівництва [2].

Автори детально розглянули дві основні методології застосування BIM: централізований підхід (central tank method), де всі дані проєкту зберігаються в єдиній базі даних, та розширений підхід (extended reservoir method), що передбачає інтеграцію незалежних баз даних через механізм інтероперабельності. У дослідженні акцентовано увагу на впливі BIM на етапах до будівництва, під час будівництва та після завершення проєкту, що охоплює проєктування, управління матеріалами, планування графіків робіт і контроль якості. Було продемонстровано, що BIM дозволяє проводити ефективний аналіз проєктних рішень за допомогою 3D-візуалізації, 4D-

планування та 5D-оцінки витрат, що допомагає виявляти потенційні конфлікти ще на етапі проєктування та мінімізувати їх вплив на будівельний процес [2].

Дослідники також розглянули роль BIM у підвищенні безпеки будівельних робіт. Завдяки можливостям візуалізації, BIM дозволяє ідентифікувати потенційні ризики та небезпечні зони на будівельному майданчику ще до початку фізичних робіт. Інтеграція з хмарними технологіями дозволяє забезпечити ефективний обмін інформацією між усіма учасниками будівельного процесу, включаючи архітекторів, інженерів, менеджерів проєкту та підрядників. Також було досліджено можливість використання BIM для зниження енергоспоживання завдяки симуляції енергоефективності будівель, аналізу систем освітлення та прогнозуванню споживання ресурсів [2].

У сфері управління ризиками BIM дозволяє створити базу даних ризиків, що включає як внутрішні, так і зовнішні ризики будівельного проєкту. Дослідження показало, що використання BIM сприяє ранньому виявленню ризиків і впровадженню превентивних заходів для їх мінімізації. Також було продемонстровано, що BIM може бути використаний для створення інтелектуальних систем управління будівлею, що дозволяє інтегрувати дані про стан будівельних об'єктів у реальному часі, забезпечуючи кращий контроль над ресурсами [2].

У статті «Do you need a blockchain in construction? Use case categories and decision framework for DLT design options» автори досліджують потенціал Distributed Ledger Technology (DLT) – технології розподіленого реєстру та її застосування в будівельній галузі. Метою дослідження є подолання розриву між теоретичними можливостями DLT та її практичною реалізацією в будівництві. Автори аналізують існуючі випадки використання DLT у будівельних проєктах, класифікують їх за категоріями та пропонують рамкову модель для вибору відповідного типу DLT залежно від конкретних вимог до проєкту [3].

Дослідження побудоване на систематичному огляді літератури, що охоплює 24 потенційні випадки використання DLT у будівництві, які згруповано у сім основних категорій: внутрішнє адміністративне використання, автоматизація транзакцій між учасниками за допомогою смарт-контрактів, незмінний запис транзакцій, незмінний запис активів та власності, токени як платіжний або мотиваційний інструмент, децентралізовані застосунки (DApps) та децентралізовані автономні організації (DAOs). Кожна категорія відповідає певній цінності DLT, наприклад, підвищенню прозорості, ефективності або автоматизації бізнес-процесів [3].

У рамках дослідження було розроблено триетапну модель прийняття рішень щодо впровадження DLT. Перший етап відповідає на запитання: «Чи потрібен DLT для цього випадку використання?». Тут оцінюється необхідність зберігання даних, кількість авторів змін у системі, можливість використання третьої довіреної сторони (ТТР) та рівень довіри між учасниками. На другому етапі визначається, який саме тип DLT (публічний, приватний, з дозволами або без них) є найбільш відповідним для конкретного випадку, враховуючи такі критерії, як доступ до даних, необхідність прозорості та контроль функцій на рівні протоколу. Третій етап передбачає врахування додаткових технічних обмежень, таких як продуктивність, обсяг зберігання даних, взаємодія з іншими системами, конфіденційність, підтримка смарт-контрактів та структура витрат [3].

У дослідженні показано, що DLT може значно підвищити прозорість і довіру між учасниками будівельних проєктів, а також автоматизувати адміністративні процеси та контроль виконання робіт. Зокрема, можливості смарт-контрактів дозволяють автоматизувати транзакції, контролювати виконання контрактних зобов'язань та забезпечувати достовірність даних у реальному часі. Проте автори підкреслюють, що у багатьох випадках існує можливість використання третьої довіреної сторони, що

робить впровадження DLT необов'язковим. Використання DLT є виправданим у випадках, коли потрібна децентралізація, висока прозорість та автоматизація складних процесів [3].

Результати дослідження вказують на значний потенціал DLT для оптимізації ланцюгів поставок, автоматизації адміністративних завдань та створення децентралізованих рішень для управління даними у будівельних проєктах. Водночас, автори закликають до подальших досліджень, особливо у контексті створення прототипів та впровадження DLT у реальних проєктах для кількісного вимірювання їхньої ефективності [3].

Фахівці з Індії досліджують можливості впровадження інтегрованої інформаційної системи для управління виробничими процесами в будівництві. Основна увага приділена створенню автоматизованої системи на основі SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), яка здатна інтегрувати планування, моніторинг, контроль і виконання завдань, забезпечуючи повний цикл управління будівельним процесом. Метою дослідження є розробка інструментарію, що дозволяє усунути основні проблеми будівельного виробництва, такі як недостатня координація, відсутність прозорості, низький рівень стандартизації процесів і неефективне управління ресурсами [4].

Методологія дослідження базується на поєднанні методів Lean Construction, технологій SCADA, машинного навчання, LiDAR, BIM, а також застосуванні принципів «Genchi Genbutsu» (йди до джерела і отримай факти) для ефективного управління. Система передбачає двоетапний підхід: «зверху вниз» (top-down) для збору даних з навколишнього середовища будівельного майданчика за допомогою датчиків, дронів і LiDAR, та «знизу вгору» (bottom-up) для аналізу діяльності робітників і продуктивності. Ці дані поєднуються в машинному навчальному модулі, який порівнює фактичні дані з плановими моделями BIM для виявлення відхилень і визначення необхідних коригувальних дій [4].

Ключовими факторами, що впливають на успішність інтеграції, є впровадження гнучких сенсорних систем, централізація даних у так званій «кімнаті управління» (Control Room), використання машинного навчання для аналізу продуктивності та оптимізація ресурсів [4]. SCADA-система забезпечує збирання та обробку даних у реальному часі, дозволяючи швидко виявляти проблеми та вживати заходів для їх усунення. Зокрема, автоматичний моніторинг дозволяє уникати перевантаження обладнання (Muri), нерівномірності виробництва (Mura) та марнотратства ресурсів (Muda) [4].

Результати дослідження демонструють, що впровадження інтегрованої інформаційної системи дозволяє значно підвищити продуктивність, забезпечити прозорість на всіх етапах будівництва, покращити координацію між учасниками проєкту та мінімізувати витрати. Використання машинного навчання дозволяє не лише виявляти відхилення, але й прогнозувати потенційні проблеми на основі історичних даних та реальних умов будівельного майданчика. Дослідження також підкреслює важливість хмарних технологій для зберігання та обміну даними, що дозволяє підвищити рівень інтеграції та координації в рамках будівельних проєктів [4].

Також важливим аспектом є управління змінами у будівництві. Інші науковці досліджують підходи до управління змінами при впровадженні нових технологій у галузі архітектури, інженерії та будівництва (AEC). Основною метою дослідження є виявлення взаємозв'язків між конкретними практиками управління змінами та успішністю впровадження технологічних рішень у організаціях галузі AEC. Дослідження базується на аналізі 167 кейсів організаційних змін, зібраних шляхом онлайн-опитування серед компаній у США та Канаді [5].

Методологія включає кореляційний аналіз між практиками управління змінами та успішністю їх впровадження, а також перевірку надійності даних за допомогою

тесту Кронбаха та аналізу головних компонентів (PCA). Дослідники виділили сім ключових практик управління змінами: залучення старшого керівництва, надання ресурсів для навчання, комунікація переваг змін, реалістичний часовий горизонт впровадження, ефективність агентів змін, встановлення вимірюваних еталонів прогресу та коригування робочого навантаження. Кожна з цих практик аналізувалася у контексті її впливу на досягнення цілей впровадження технологій, довгострокову сталість змін та отримання конкретних вигод від їх впровадження [5].

Результати дослідження показали, що найсильніший позитивний вплив на успішність змін мають ефективність агентів змін, встановлення вимірюваних еталонів, реалістичний часовий горизонт та комунікація переваг змін. Ці фактори забезпечують ефективний процес трансформації організаційних процесів і допомагають долати опір змінам на всіх рівнях управління. Практики, такі як залучення старшого керівництва та забезпечення навчальних ресурсів, також відіграють важливу роль, але мають менш виражений вплив порівняно з першими чотирма. Корекція робочого навантаження була ідентифікована як найменш впливова практика [5].

Дослідження також виявило, що успішність впровадження технологій варіюється залежно від типу організації та ієрархічного положення співробітників. Зокрема, старші керівники демонструють вищий рівень задоволеності впровадженням змін, тоді як члени проєктних команд частіше стикаються з перешкодами та відчують більше навантаження. Організації, які спеціалізуються на конкретних завданнях (наприклад, субпідрядники), досягають вищого рівня успіху в порівнянні з більш загальними будівельними підрядниками [5].

Важливим висновком дослідження є те, що технологічний тип (програмне забезпечення для бізнес-процесів, програмне забезпечення для управління проєктами або апаратні технології) не має значного впливу

на успіх впровадження змін. Аналогічно, відмінності між новими технологіями та оновленнями існуючих систем також не були статистично значущими. Це підкреслює важливість саме організаційних практик управління змінами, а не типу технології [5].

У підсумку було підкреслено важливість системного підходу до управління змінами, який передбачає активне залучення старшого керівництва, чітке визначення етапів впровадження, використання ефективних агентів змін та регулярне вимірювання результатів на основі встановлених показників ефективності. Подальші дослідження повинні зосередитися на більш детальному аналізі взаємозв'язків між практиками управління змінами, характеристиками технологій та специфікою організацій у різних підгалузях будівництва [5].

Наукова новизна. Дослідження полягає у розробці та впровадженні новітнього підходу до формування організаційно-технологічних рішень у будівництві, що базується на інтеграції сучасних інформаційних технологій, таких як Building Information Modeling (BIM), автоматизовані системи управління будівельними процесами та цифрові платформи. Цей підхід дозволяє створити єдину цифрову екосистему будівельного проєкту, забезпечуючи синхронізацію та координацію між усіма етапами будівництва. Важливу роль відіграють методи віртуального моделювання, аналізу даних у реальному часі та інтеграції управлінських систем, що підвищують прозорість, точність та ефективність будівельних робіт.

Наукова значимість дослідження полягає у глибокому аналізі впливу інформаційних технологій на ефективність будівельних процесів, що охоплює аспекти оптимізації ресурсного планування, моніторингу якості та контролю термінів виконання робіт. Запропоновані інноваційні методи дозволяють знизити витрати ресурсів, скоротити терміни будівництва та підвищити якість реалізації проєктів.

Практична значимість дослідження полягає у розробці конкретних рекомендацій

та методик для успішного впровадження сучасних інформаційних технологій у будівельні процеси. Запропоновані підходи забезпечують інтеграцію різних цифрових інструментів та створення адаптивних управлінських систем, що відповідають сучасним викликам будівельної галузі. Таким чином, результати дослідження роблять вагомий внесок у розвиток логістичної теорії та практики у будівництві.

Загальні висновки. Інтеграція сучасних інформаційних технологій є ключовим фактором підвищення ефективності організаційно-технологічних рішень у будівництві. Використання систем BIM, автоматизованих систем управління будівельними процесами та цифрових платформ дозволяє значно покращити планування, контроль і реалізацію проєктів. Ці технології забезпечують прозорість, оптимізацію ресурсів і підвищення якості робіт.

Особливу роль відіграє віртуальне моделювання, аналіз даних у реальному часі та інтеграція різних систем управління у єдину цифрову екосистему будівельного проєкту. Це дозволяє своєчасно виявляти відхилення, мінімізувати ризики та забезпечувати безперервність робіт.

Дослідження підкреслює важливість впровадження інноваційних методів моніторингу, таких як технології IoT, штучний інтелект і блокчейн. Ці інструменти дозволяють покращити координацію між етапами проєкту, забезпечити достовірність даних та автоматизувати адміністративні процеси.

Оптимізація організаційно-технологічних рішень дозволяє зменшити витрати ресурсів, скоротити терміни будівництва та забезпечити високу якість виконання робіт. Практичні рекомендації, представлені у дослідженні, можуть бути корисними для будівельних компаній, що прагнуть підвищити ефективність своїх операцій та досягти стратегічних цілей.

Загальні висновки підкреслюють важливість інтегрованого підходу до управління будівельними процесами, що включає використання сучасних технологій,

підвищення кваліфікації працівників та адаптацію до змінюваних умов ринку. Постійні дослідження та впровадження інноваційних методів є необхідними для подальшого розвитку будівельної галузі.

Перспективи. Після завершення війни Україна матиме унікальний шанс не лише відновити інфраструктуру, а й трансформувати будівельну галузь, зробивши її цифрово керованою, ефективною та стійкою. Важливим напрямом стане вдосконалення методів організаційно-технологічних рішень із впровадженням сучасного інформаційного забезпечення.

Основні фактори, що впливають на цей процес:

1. Інтеграція BIM-технологій для цифрового моделювання об'єктів будівництва на всіх етапах.
2. Автоматизація управління будівельними процесами через цифрові платформи.
3. Використання IoT для моніторингу техніки, матеріалів і безпеки на об'єктах у реальному часі.
4. Аналітика на основі штучного інтелекту – для прогнозування потреб у ресурсах та управління ризиками.
5. Урахування екологічних стандартів та принципів сталого будівництва.
6. Цифрова логістика – оптимізація постачань, транспортування та управління відходами.
7. Міжгалузевий обмін досвідом – впровадження рішень із суміжних сфер.
8. Оптимізація взаємодії між учасниками проєктів завдяки єдиним цифровим середовищам.
9. Створення цифрових екосистем – для інтегрованого управління процесами та даними.

Застосування цих підходів сприятиме скороченню витрат і строків реалізації, підвищенню прозорості, якості та адаптивності будівельних проєктів, що є критично важливим для ефективної післявоєнної відбудови України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Enes Yigitbas, Alexander Nowosad, Gregor Engels. Supporting Construction and Architectural Visualization through BIM and AR/VR : a systematic literature review. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2306.12274.
2. Paniz Pouryaghoubi, Arefeh Mohammadi. Examining the Position of Building Information Modeling (BIM) Technology in Different Dimensions of Building Smartness. Ferdowsi University of Mashhad, Iran, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2309.03015.
3. Jens J. Hunhevicz, Daniel M. Hall. Do you need a blockchain in construction? Use case categories and decision framework for DLT design options. *Advanced Engineering Informatics*. 2020. DOI: 10.1016/j.aei.2020.101094.
4. Ricardo Antunes, Mani Poshdar. Envision of an Integrated Information System for Project-Driven Production in Construction. *26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*. 2018. DOI: 10.24928/2018/0511.
5. Sarah Dyson. Adopting Information System Technologies in Construction Project Management. Harrisburg University of Science and Technology. 2019. URL: <https://digitalcommons.harrisburgu.edu/dandt/5/>

REFERENCES

1. Enes Yigitbas, Alexander Nowosad and Gregor Engels. Supporting Construction and Architectural Visualization through BIM and AR/VR : a systematic literature review. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2306.12274.
2. Paniz Pouryaghoubi and Arefeh Mohammadi. Examining the Position of Building Information Modeling (BIM) Technology in Different Dimensions of Building Smartness. Ferdowsi University of Mashhad, Iran, 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2309.03015.
3. Jens J. Hunhevicz and Daniel M. Hall Do you need a blockchain in construction? Use case categories and decision framework for DLT design options. *Advanced Engineering Informatics*. 2020. DOI: 10.1016/j.aei.2020.101094.
4. Ricardo Antunes and Mani Poshdar. Envision of an Integrated Information System for Project-Driven Production in Construction. *26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*. 2018. DOI: 10.24928/2018/0511.
5. Sarah Dyson. Adopting Information System Technologies in Construction Project Management. Harrisburg University of Science and Technology, 2019. URL: <https://digitalcommons.harrisburgu.edu/dandt/5/>

Надійшла до редакції: 29.08.2025.

УДК 691.32

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.90.1195

МОЖЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ СКОРОЧЕННЯ ВИКИДІВ CO₂ В АТМОСФЕРУ БУДІВЕЛЬНОЮ ГАЛУЗЗЮ

НІКІФОРОВА Т. Д.^{1*}, *докт. техн. наук, проф.*,
ФЕДІН В. А.², *здоб.*

^{1*} Кафедра залізобетонних і 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 (056) 756-33-66, e-mail: t.d.nikiforova@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

² Кафедра залізобетонних і 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 (056) 756-33-66, e-mail: v.a.fedin@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8829-7520

Анотація. У статті висвітлено актуальні проблеми екологічного впливу будівельної галузі на довкілля, з особливим акцентом на процес виробництва цементу як одного з найбільш енергоємних і забруднюючих серед усіх галузей промисловості. Зазначено, що виробництво цементу є джерелом близько 8 % глобальних антропогенних викидів вуглекислого газу (CO₂), що пов'язано насамперед із процесом термічного розкладання карбонатів у виробництві клінкеру – основного компоненту цементу. Через значні обсяги виробництва і постійне зростання попиту на будівельні матеріали, негативний вплив на довкілля набуває сталого та невідворотного характеру в довгостроковій перспективі. У статті досліджуються основні джерела забруднення та пропонуються шляхи їхнього зменшення. Особливу увагу приділено пошуку ефективних і екологічно безпечних технологічних рішень, зокрема зменшенню співвідношення клінкеру до цементу, застосуванню альтернативних в'язучих матеріалів, а також впровадженню екологічних заповнювачів у склади бетонних композитів. Розглянуто можливість використання промислових відходів, таких як шлаки, летка зола, пуцолани та інші вторинні матеріали, здатні замінити традиційні компоненти цементу та бетону без втрати їх технічних характеристик. **Мета статті** – полягає у всебічному аналізі можливостей та перспектив зниження рівня викидів діоксиду вуглецю (CO₂) в атмосферу в процесі виробництва цементу та бетонних композитів шляхом упровадження екологічно доцільних інноваційних рішень. Зокрема, дослідження зосереджене на оцінці ефективності використання альтернативних екологічних матеріалів як заповнювачів у бетонних сумішах, а також на вивченні їх впливу на технологічні характеристики. Метою є визначення таких матеріалів і технологій, що не лише сприяють зменшенню вуглецевого сліду, але й забезпечують відповідність сучасним технічним вимогам і стандартам будівництва. Окрему увагу приділено розробці практичних рекомендацій щодо заміщення традиційних компонентів на більш екологічно безпечні аналоги, що дозволяє інтегрувати принципи сталого розвитку у виробничі процеси будівельної індустрії. **Висновок.** Розглянуто та проаналізовано екологічні аспекти та технічні можливості зниження викидів CO₂ у процесі виробництва цементу й бетону шляхом використання альтернативних матеріалів та інноваційних підходів. Основними методами зменшення вуглецевого сліду є зниження коефіцієнта клінкеру до цементу, застосування альтернативних в'язучих матеріалів, а також використання екологічних заповнювачів.

Ключові слова: бетон; екобетон; вуглецевий слід; деревина; екологічні заповнювачі для бетонів

OPPORTUNITIES AND PROSPECTS FOR REDUCING CO₂ EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE BY THE CONSTRUCTION INDUSTRY

NIKIFOROVA T. D.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
FEDIN V. A.², *Postgrad. Stud.*

^{1*} Department of Reinforced Concrete and Stone 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 (056) 756-33-66, e-mail: t.d.nikiforova@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

² Department of Reinforced Concrete and Stone 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 (056) 756-33-66, e-mail: v.a.fedin@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8829-7520

Abstract. The article highlights pressing environmental issues associated with the construction industry, with a particular emphasis on cement production, which is among the most energy-intensive and polluting sectors of all industrial

activities. It is noted that cement manufacturing accounts for approximately 8 % of global anthropogenic carbon dioxide (CO₂) emissions, primarily due to the thermal decomposition of carbonates during the production of clinker – the key component of cement. Given the high production volumes and the continuous growth in demand for construction materials, the environmental impact has become persistent and irreversible in the long term. The study investigates the main sources of pollution and proposes strategies for their mitigation. Special attention is given to the search for efficient and environmentally sound technological solutions, including reducing the clinker-to-cement ratio, utilizing alternative binders, and incorporating ecological aggregates into concrete composites. The possibility of using industrial by-products such as slags, fly ash, pozzolans, and other secondary materials is considered, as these can replace conventional components of cement and concrete without compromising technical performance. **The purpose of the article.** Comprehensive analysis of the possibilities and prospects for reducing carbon dioxide (CO₂) emissions in the production of cement and concrete composites through the implementation of environmentally sustainable innovative solutions. In particular, the research focuses on assessing the effectiveness of alternative ecological materials used as aggregates in concrete mixtures and evaluating their influence on technological properties. The objective is to identify materials and technologies that not only contribute to a lower carbon footprint but also meet contemporary technical requirements and construction standards. Special consideration is given to the development of practical recommendations for replacing traditional components with more environmentally friendly alternatives, enabling the integration of sustainable development principles into the manufacturing processes of the construction industry. **Conclusion.** The environmental aspects and technical possibilities of reducing CO₂ emissions in the cement and concrete production process through the use of alternative materials and innovative approaches are considered. The main methods of reducing the carbon footprint are reducing the clinker to cement ratio, using alternative binders, and using environmentally friendly aggregates.

Keywords: concrete; eco-concrete; carbon footprint; wood; ecological aggregates for concrete

Актуальність. Будівельна галузь є ресурсо- та енергоємною. Вона споживає понад 50 % усієї видобутої сировини у світі, генерує 25–33 % відходів у ЄС, викидає найвищий рівень вуглецю серед усіх галузей та відповідає за 40 % світового енергоспоживання в будівлях [1].

Викиди вуглекислого газу антропогенного походження в основному формуються з трьох джерел: спалювання викопного палива, змін екосистеми в наслідок людської діяльності, таких як вирубка лісів, та розкладання карбонатів. Найбільшим джерелом викидів від розкладу карбонатів є виробництво цементу, який з давніх часів служить важливим будівельним матеріалом. Проте різке зростання виробництва цементу почалося після другої світової війни. Сьогодні обсяги його виробництва сягають понад пів тонни на одну людину щорічно. З 1950 року обсяг виробництва цементу зріс більше ніж у 30 разів, а з 1990 року – майже в 4 рази. Це зростання значно випереджає збільшення виробництва викопного палива за останні 20 років. Основним джерелом цього явища є Китай, де виробництво цементу зросло в 11 разів із 1990 року, на що припадає 74 % світового приросту у цій галузі.

Іншим вагомим джерелом викидів CO₂ є споживання викопного палива для

виробництва цементу. Під час нагрівання сировини необхідно досягти температури понад 1 000 °C при спалюванні палива. Енергетичні викиди, зокрема від використання електроенергії, можуть збільшити технологічні викиди до 60 %. Таким чином, загальний внесок цементної промисловості у світові викиди CO₂ може досягати 8 %. Ці викиди, пов'язані з промисловими процесами та енерговитратами, часто враховуються окремо у світових звітах про викиди.

TheGlobalCarbon Project щорічно надає дані щодо викидів CO₂, спричинених використанням викопного палива та виробництвом цементу. Ці оцінки широко застосовуються для формування Global Carbon Budget. Точність таких оцінок є критично важливою, оскільки вони охоплюють усі викиди CO₂, включаючи ті, що виникають у рамках промислових процесів. Завдяки цьому дані щодо викидів від цементної промисловості є складовою частиною глобального аналізу, забезпечуючи повноту охоплення основних джерел вуглецевих викидів [2].

Постановка проблеми. Оскільки будівельна галузь є одним з найінтенсивніших джерел викидів CO₂ через використання цементу або його похідного композиту – залізобетону, однією з головних

проблем галузі на ряду зі зниженням енергоємності та ресурсоємності будівельних матеріалів, виробів та конструкцій є екологічність самих матеріалів або конструкцій при забезпеченні необхідних фізико-механічних властивостей матеріалів і характеристик конструкцій. Екологічність будівельних конструкцій може досягатись такими методами, як підвищення позитивних екологічних характеристик, або покращенням експлуатаційних характеристик, таких як збільшення експлуатаційного терміну при аналогічних викидах CO₂ при виготовленні елементів конструкцій.

Мета дослідження. Мета дослідження полягає у аналізі можливостей та перспектив скорочення викидів CO₂ у атмосферу. Основні напрями дослідження направлені на використання на пошук альтернативних екологічних матеріалів у якості заповнювачів та аналізі результатів використання останніх.

Результати дослідження. Під час виготовлення елементів конструкцій з бетону, а саме з моменту початку полімеризації проходить хімічна екзотермічна реакція, яка бере участь у виробництві основного компонента цементу, клінкеру, оскільки карбонати (переважно CaCO₃, що входять до складу вапняку) розкладаються на оксиди (переважно вапно – CaO) і CO₂. Ці викиди (E) можна розрахувати наступним чином [3]:

$$E = \frac{M_r^{CO_2}}{M_r^{CaO}} \cdot f_{clink}^{CaO} \cdot f_{cem}^{clink} \cdot M_{cem}, \quad (1)$$

$M_r^{CO_2}$ – молекулярна маса CO₂; M_r^{CaO} – молекулярна маса CaO; f_{clink}^{CaO} – частка CaO в клінкері; f_{cem}^{clink} – частка клінкеру в цементі («клінкерне співвідношення»); M_{cem} – маса цементу.

Формулу (1) можна використовувати при використанні наступних методів зниження CO₂ при виготовленні цементів:

- зниження співвідношення клінкеру до цементу;
- альтернативні в'язучі матеріали.

Зменшення коефіцієнта клінкеру є одним із найефективніших способів

скоротити викиди CO₂ під час виробництва цементу, оскільки цей коефіцієнт впливає як на викиди CO₂ від виготовлення сировини, так і від спалювання палива. У 2014 році середній світовий коефіцієнт клінкеру становив 0,65. У Китаї цей показник також був на рівні 0,65 у 2018 році [4], зокрема завдяки використанню золи та шлаку. У Німеччині у 2017 році коефіцієнт клінкеру становив 0,71, а середній показник по Європі у 2016 році досягав 0,74. Окремі країни, такі як Ірландія та Данія, мали коефіцієнти близько 0,90, тоді як Нідерланди досягли значення приблизно 0,46. Незважаючи на те, що зменшення коефіцієнта клінкеру є бажаним і технічно здійсненним, доступність відповідних матеріалів-замінників може обмежувати його впровадження в окремих регіонах. Водночас важливо забезпечити ефективність використання цементу в бетоні з урахуванням його призначення та впливу на довкілля [11].

Найбільш поширеними в'язучими для виготовлення цементу є:

- мелений гранульований доменний шлак (GGBFS);
- зола винесення;
- пуцолани натуральні;
- вапняк.

Гранульований доменний шлак (GGBFS) є побічним продуктом виробництва чавуну — основної сировини для сталеплавильного виробництва. Завдяки швидкому охолодженню при виході з доменної печі, GGBFS має понад 90 % аморфної структури, а його основний (лужний) характер зумовлює латентну гідравлічну активність. Цементи з вмістом GGBFS демонструють відмінні характеристики в бетоні, зокрема покращену довговічність у деяких аспектах. Так звані шлакові цементи застосовуються з початку індустріального виробництва цементу, тобто ще з XIX століття.

Прогнозування глобальної доступності GGBFS є складним завданням, однак Міжнародне енергетичне агентство (IEA) розробило відповідний сценарій [5].

Довгострокова доступність GGBFS пов'язана з подальшим підвищенням

енергоефективності та ресурсоефективності у сталеливарному секторі, особливо через збільшення використання металобрухту в електродугових печах. Водночас, оскільки обсяги доступного брухту обмежені, значні кількості чавуну й надалі вироблятимуться з залізної руди – в тому числі й після 2020 року – що забезпечуватиме відповідні обсяги GGBFS у глобальному масштабі [5]. Проте обмежена регіональна наявність цього матеріалу може ускладнити його закупівлю виробниками цементу.

Золю винесення отримують шляхом електростатичного або механічного осадження пилоподібних частинок із димових газів, що утворюються при спалюванні вугілля у подрібненому стані. Її мінералогічний склад може бути кремнеземистим або вапняковим, залежно від типу вугілля, що використовується. Основними компонентами золи винесення є SiO_2 та Al_2O_3 , а у випадку вапнякових – також CaO . Найчастіше використовуються кремнеземиста зола винесення, яка має пуцоланові властивості й додається до цементу. Це покращує реологічні властивості бетонної суміші, сприяє довготривалому наростанню міцності та підвищенню довговічності бетону завдяки ущільненій структурі.

За винятком деяких випадків, вміст золи винесення у цементах технічного призначення зазвичай обмежується межами 25–35 %. Враховуючи референтне значення клінкерного фактору 0,75, збільшення вмісту золи до цього рівня дозволяє знизити прямі викиди CO_2 від виробництва цементу до 90 кг CO_2 на 1 тону цементу [6].

Довгострокова доступність золи винесення у світі значною мірою залежить від кількості вугільних електростанцій, чисельність яких, як очікується, буде зменшуватися через зростаючу частку відновлюваних джерел енергії. Проте дослідження, проведене Boston Consulting Group у 2018 році [7], підкреслює, що економічний розвиток країн Азії зумовить зростання попиту на енергію, а отже – й на вугілля, що сприятиме відносно стабільному виробництву золи винесення у найближчі

роки. Натомість у Європі нормативне обмеження використання вугілля поступово ускладнює доступ до цього виду вторинної сировини.

Природні пуцолани зазвичай формуються з матеріалів вулканічного походження або осадових порід, які мають відповідний хімічний та мінералогічний склад. Вони складаються переважно з аморфних або слабо кристалізованих кремнеземистих сполук, які трапляються лише в певних регіонах. У присутності води за звичайної температури такі матеріали вступають у реакцію з розчиненим гідроксидом кальцію, утворюючи фази C–A–S–H (Calcium Aluminate Silicate Hydrates – гідрати алюмінату силікату кальцію). Реакційна активність пуцоланів залежить від вмісту активного кремнезему та глинозему. Перед використанням вони потребують обробки, яка включає дроблення, сушіння та подрібнення. Їх додавання також може сприяти зниженню енергозатрат під час помелу цементу.

Глобальні геологічні запаси глини є значними, однак на даний момент лише декілька країн використовують кальциновані глини у виробництві цементу. На відміну від золи винесення або гранульованого доменного шлаку (GGBFS), кальциновані глини не є побічним продуктом і потребують наявності відповідної виробничої інфраструктури. Дослідження показали, що за умов термічної активації навіть малопридатних каоолінових глини можна отримати гідний матеріал [8]. Очікується, що частка таких глини у складі цементу зростатиме в регіонах, де відсутній доступ до інших альтернативних мінеральних домішок (SCM), а в довгостроковій перспективі – і в глобальному масштабі, коли доступ до золи й шлаку стане все більш обмеженим.

Трикомпонентна суміш, що складається з клінкеру, глини та вапняку, дозволяє досягати більш високого рівня заміщення клінкеру. При клінкерному факторі 50 % такі цементи здатні забезпечити рівень міцності, співставний із портландцементом (OPC) [9]. Дослідження показали, що цементи з кальцинованими глинами мають високу

довговічність – навіть за умов сильного морозного впливу бетон на їх основі проявляє добру експлуатаційну надійність [10].

Показником якості кальцинованої глини є вміст реакційно-здатного діоксиду кремнію, мінімальний рівень якого, згідно з європейським стандартом EN 197-1, має становити не менше 25 %. Загальне зменшення викидів CO₂ у цементах, що містять кальциновані глини та вапняк як SCM (Supplementary Cementitious Materials), у порівнянні з іншими типами композитних цементів, залежать від якості глин, зокрема залишкового вмісту карбонату кальцію, необхідної енергії для термічної активації та, меншою мірою, електроенергії, потрібної для подрібнення. Кальциновані глини мають значний потенціал для заміщення клінкеру в регіонах світу, де бракує інших альтернативних SCM, за умови наявності придатних локальних глин.

Вапняк доступний практично в необмеженій кількості, і його можна просто подрібнити. Зазвичай він легкодоступний для більшості цементних заводів, і при додаванні до цементу він покращує технологічність відповідних бетонів, як правило, завдяки меншій потребі у воді відповідного цементу. Невелика частина вапняку реагує з алюмінатами цементу, утворюючи додаткові карбоалюмінати. Рівні заміни навіть до 50 % можливі, але вимагають ретельного розгляду аспектів довговічності в контексті впливу бетону на навколишнє середовище [11].

На сьогоднішній день не зважаючи на беззаперечне лідерство портландцементного клінкеру серед в'язучих матеріалів, активно розробляються та впроваджуються екологічні альтернативи, покликані зменшити вплив будівельної галузі на зовнішнє середовище.

Белітовий клінкер – містить невелику кількість аліту, але вміст беліту сягає від 40 % до 90 %. Виготовлення даного клінкеру супроводжується меншим викидом CO₂, і в порівнянні зі звичайним портландцементним клінкером, виробництво беліту зменшено на 6–8 %, але через механічні властивості беліту

подрібнення потребує додаткових потужностей для приведення його у стан готовий до виготовлення конструкцій. Белітові цементи мають низьке виділення теплоти під час реакції гідратації, отже набір міцності (механічних властивостей) бетону відбувається повільніше.

Цементи з сульфоалюмінатів демонструють властивості швидкого схоплювання та високу швидкість набуття механічних властивостей. Виготовлення таких цементів порівняно з ординарними портландцементами призводить до зменшення викидів CO₂ на 20–30 % [12], але використання рідкісного мінералу яліміту Ca₄(AlO₂)₆SO₃, який є в основі сульфоалюмінатного клінкеру призводить до надлишкових витрат виробництва при виготовленні сульфоалюмінатного клінкеру і не раціонально з економічної точки зору.

На сьогодні впровадження альтернативних в'язучих матеріалів на ринку значно ускладнюється через високі витрати на сировину, необхідність значних інвестицій і часто обмежену сферу їхнього застосування. У порівнянні зі світовим попитом на цемент, нові в'язучі, швидше за все, залишаться в межах нішевих сегментів ринку. Водночас, збільшення фінансування дослідницьких і демонстраційних проєктів, а також активізація процесу стандартизації можуть стати рушійною силою для впровадження або тестування перспективних матеріалів. Це дозволить оцінити їхній реальний вплив на загальні викиди CO₂ і визначити ефективність у довгостроковій перспективі.

Враховуючи економічну складову при виготовленні альтернатив портландцементного клінкеру можна розглянути використання замість звичайного щебню альтернативних екологічних матеріалів у якості заповнювачів, або заповнювачів із відновлювальних ресурсів. Такі заповнювачі впливають на екологічні показники бетонів:

- підвищення раціональності використання корисних копалин;
- зменшення викидів CO₂ при обробці матеріалів у стан, готовий до використання у бетонах.

Як приклад, у якості екологічного заповнювача можуть виступати деревина або відходи на основі деревини.

Відходи з деревини утворюються під час різних промислових процесів, таких як виготовлення меблів, будівельні роботи та інші види діяльності, пов'язані з використанням деревини для виробництва продукції. Зазвичай ці відходи та залишки деревини застосовуються як паливо печей або електростанцій. За різними оцінками, щорічно у світі генерується приблизно 136 мільйонів тонн деревних відходів. Накопичення таких відходів створює серйозну екологічну проблему, оскільки завдає шкоди землі та прилеглим територіям. Рациональна утилізація цих відходів є актуальним питанням, яке викликає дедалі більше занепокоєння в деревообробній галузі.

Деревобетон є швидкою, економічно вигідною та екологічно дружньою альтернативою традиційним бетонним матеріалам. Його виготовлення базується на ущільненні дрібнозернистої бетонної суміші, що дозволяє створювати однорідний матеріал з високими експлуатаційними властивостями та правильною формою. Технологія виробництва деревобетону легко адаптується до індивідуальних потреб користувачів, завдяки регулюванню таких параметрів, як склад суміші, водоцементного співвідношення і типу обладнання. Така технологія особливо перспективна в регіонах із легким доступом до необхідної сировини. Основними компонентами деревобетону є цемент, дрібний заповнювач, великий заповнювач (зокрема відходи деревини та щебінь) і вода.

Використання переробленої деревини у експериментальних деревобетонних зразках при випробуваннях на стиск показали задовільні результати, при певних відсотках

заміни крупного заповнювача на відходи з деревини, а саме 15 %. При такій кількості переробленої деревини отримано +3,06 % до міцності на стиск. Також при випробуванні на розрив, зразки з аналогічним складом, а саме 15 %, отримано +9,75 % до міцності. При випробуванні на вогнестійкість, на контрольному зразку були відсутні фізичні зміни у бетоні через нагрівання. Однак, при збільшенні відсоткового змісту деревного заповнювача відбувались зміни в бетоні у вигляді зміни кольору бетону по мірі його нагріву з світло-коричневого до темно-коричневого, що свідчило про процеси горіння легкозаймистих частин деревобетону, а саме деревини. В якості проміжного висновку по вогнестійкості можна дійти висновку, що менший вміст деревинної складової забезпечує вищу базову вогнестійкість у порівнянні з бетонами з більшим відсотковим вмістом деревинного заповнювача [13]. Таким чином, технологія виготовлення екологічних бетонів при використанні деревини або відходів на основі деревини для бетонного композиту є перспективним напрямом зменшення викидів CO₂, але з урахуванням особливих властивостей деревини та вирішенні проблемних питань використання останньої.

Висновки

Розглянуто екологічні аспекти та технічні можливості зниження викидів CO₂ у процесі виробництва цементу й бетону шляхом використання альтернативних екологічних матеріалів та інноваційних підходів. Основними методами зменшення вуглецевого сліду є зниження коефіцієнта клінкеру до цементу, застосування альтернативних в'язучих матеріалів, а також використання екологічних заповнювачів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ruuska A., Häkkinen T. Material Efficiency of Building Construction. *Buildings*. 2014. Vol. 4 (3). Pp. 266–294. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings4030266>
2. Andrew R. M. Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018. *ESSD*. 2019. Vol. 11. Pp. 1675–1710. URL: <https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>
3. Boden T. A., Marland G., Andres R. J. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, 2017. URL: https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/overview_2014
4. Junxiao W., Kuang C., Yuanbo G. Evaluation and mitigation of cement CO₂ emissions : projection of emission scenarios toward 2030 in China and proposal of the roadmap to a low-carbon world by 2050. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2019. Vol. 24. Pp. 301–328.
5. International Energy Agency. Tracking Clean Energy Progress 2017 : Energy Technology Perspectives 2017. Excerpt Informing Energy Sector Transformations. *International Energy Agency, IEA*. Paris, 2017. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/580c0f94-0db8-4dc8-9947-66720737cb3a/TrackingCleanEnergyProgress2017.pdf>
6. European Cement Research Academy. Development of State of the Art-techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead. *European Cement Research Academy, ECRA*. Düsseldorf, 2017. URL: https://docs.wbcsd.org/2017/06/CSI_ECRA_Technology_Papers_2017.pdf
7. Brognaux C., Boudier E., Möncks T., Gerecs M. Why Coal Will Be Burning. Boston Consulting Group. 2018. URL: https://web-assets.bcg.com/img-src/BCG-Why-Coal-Will-Keep-Burning-Mar-2018_rev_tcm9-187875.pdf
8. Schulze S., Pierkes R., Rickert J. Optimization of cements with calcined clays as supplementary cementitious materials. *Calcined Clays for Sustainable Concrete : Conference Paper*. 2015. Pp. 59–66. URL: https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_8
9. Favier A., De Wolf C., Scrivener K., Habert G. A Sustainable Future for the European Cement and Concrete Industry. *ETH Zürich*, 2018. P. 96. URL: https://europeanclimate.org/wp-content/uploads/2018/10/AB_SP_Decarbonisation_report.pdf
10. Pierkes R., Schulze S. E., Rickert J. Durability of Concretes Made with Calcined Clay Composite Cements. *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. 2018. Vol. 16. Pp. 366–371. URL: https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_59
11. Schneider M. The cement industry on the way to a low-carbon future. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 124. P. 105792. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105792>
12. Ulrich N., Frank D., Michael H., Julian L. Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen. *Karlsruher Institut für Technologie*. 2018. Vol. 7. P. 94.
13. Thandavamoorthy T. S. Wood waste as coarse aggregate in the production of concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2016. Vol. 20 (2). Pp. 125–141. URL: <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1016631>

REFERENCES

1. Ruuska A. and Häkkinen T. Material Efficiency of Building Construction. *Buildings*. 2014, vol. 4 (3), pp. 266–294. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings4030266>
2. Andrew R.M. Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018. *ESSD*. 2019, vol. 11, pp. 1675–1710. URL: <https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>
3. Boden T.A., Marland G. and Andres R.J. Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, 2017. URL: https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/emis/overview_2014
4. Junxiao W., Kuang C. and Yuanbo G. Evaluation and mitigation of cement CO₂ emissions : projection of emission scenarios toward 2030 in China and proposal of the roadmap to a low-carbon world by 2050. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 2019, vol. 24, pp. 301–328.
5. International Energy Agency. Tracking Clean Energy Progress 2017 : Energy Technology Perspectives 2017. Excerpt Informing Energy Sector Transformations. *International Energy Agency, IEA*, Paris, 2017. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/580c0f94-0db8-4dc8-9947-66720737cb3a/TrackingCleanEnergyProgress2017.pdf>
6. European Cement Research Academy. Development of State of the Art-techniques in Cement Manufacturing : Trying to Look Ahead. *European Cement Research Academy, ECRA*, Düsseldorf, 2017. URL: https://docs.wbcsd.org/2017/06/CSI_ECRA_Technology_Papers_2017.pdf
7. Brognaux C., Boudier E., Möncks T. and Gerecs M. Why Coal Will Be Burning. Boston Consulting Group. 2018. URL: https://web-assets.bcg.com/img-src/BCG-Why-Coal-Will-Keep-Burning-Mar-2018_rev_tcm9-187875.pdf
8. Schulze S., Pierkes R. and Rickert J. Optimization of cements with calcined clays as supplementary cementitious materials. *Calcined Clays for Sustainable Concrete : conference paper*. 2015, pp. 59–66. URL: https://doi.org/10.1007/978-94-017-9939-3_8

9. Favier A., De Wolf C., Scrivener K. and Habert G. A Sustainable Future for the European Cement and Concrete Industry, ETH Zürich, 2018, p. 96. URL: https://europeanclimate.org/wp-content/uploads/2018/10/AB_SP_Decarbonisation_report.pdf
10. Pierkes R., Schulze S.E. and Rickert J. Durability of Concretes Made with Calcined Clay Composite Cements. Calcined Clays for Sustainable Concrete. 2018, vol. 16, pp. 366–371. URL: https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_59
11. Schneider M. The cement industry on the way to a low-carbon future. Cement and Concrete Research. 2019, vol. 124, p. 105792. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105792>
12. Ulrich N., Frank D., Michael H. and Julian L. Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen. Karlsruher Institut für Technologie. 2018, vol. 7, p. 94. (in German).
13. Thandavamoorthy T.S. Wood waste as coarse aggregate in the production of concrete. European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2016, vol. 20 (2), pp. 125–141. URL: <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1016631>

Надійшла до редакції: 02.08.2025.

УДК 908(477):72/74

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.97.1196

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА НОВІ ПІДХОДИ В МЕМОРІАЛІЗАЦІЇ ПОДІЙ РОСІЙСЬКО-УКРАЇНСЬКОЇ ВІЙНИ ЗАСОБАМИ АРХІТЕКТУРИ ТА ДИЗАЙНУ

РУСАНОВА І. В.¹, канд. архітектури, доц.,
ЗАХАРОВА С. О.², канд. філос. наук, доц.,
РИЖОВА І. С.³, д-р філос. наук, проф.,
ХАРЧЕНКО К. С.^{4*}, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра «Дизайн», Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (067) 856-37-02, e-mail: i.rusanova2018@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-8496-6109

² Кафедра «Дизайн», Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (067) 283-17-87, e-mail: arconzp@meta.ua, ORCID ID: 0000-0002-6952-2558

³ Кафедра «Дизайн», Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, 69063, Запоріжжя, Україна, тел. +38 (067) 688-21-34, e-mail: 17design2017@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9562-200X

⁴ Кафедра дизайну та реконструкції архітектурного середовища, 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) 756-93-37, e-mail: katerinaharchenko75@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1908-4852

Анотація. Постановка проблеми. Стаття базується на колективному дослідженні національної меморіальної практики увічнення подій російсько-української війни із залученням досвіду реалізації подібних меморіальних об'єктів зі світової практики. Меморіальні комплекси розглядаються в контексті історичної, культурної та колективної пам'яті. Стверджується важливість архітектурно-проектних засобів як художньої мови меморіалізації, здатної створювати не лише форму, а й надавати символи, викликати певні настрої та емоції. Висвітлюється роль меморіалів у формуванні національної ідентичності, суспільної свідомості народу. **Мета статті:** виявити сучасні тенденції та нові підходи у меморіалізації подій російсько-української війни засобами архітектури та дизайну на основі трансформації ідеологічних інституцій суспільства, формування його історичної та колективної пам'яті, національної ідентичності. **Методологія:** дослідження передбачає порівняння, аналіз та синтез світового та українського досвіду меморіалізації подій війни в історичному та когнітивному аспектах. **Висновок.** Реалізація ідей, задумів, концепцій та символів архітекторів та дизайнерів, як генераторів, провідної ланки в єдності багатьох фахівців, залучених до створення сучасних меморіалів, може стати ефективним інструментом для створення нової історичної ідентичності народу, що базується на матеріальному втіленні колективної пам'яті та національних традицій. Проведено аналіз художніх засобів архітектури та дизайну на трьох типах меморіалів з метою виявлення їх особливостей та реалізації в часі. Меморіали розглядаються в аспекті історичної, культурної та колективної пам'яті. Обґрунтовано роль меморіалів у формуванні української ідентичності та ідеологічних тенденцій суспільства. **Практична значущість.** Практична цінність цього дослідження полягає в його потенціалі для створення матеріальної складової нової національної ідентичності українського народу.

Ключові слова: меморіальна практика; меморіальні об'єкти; комеморація; архітектурно-дизайнерські засоби; історична, культурна, колективна пам'ять; ідентичність

MODERN PROBLEMS OF MEMORIALIZATION OF THE EVENTS OF THE RUSSIAN-UKRAINIAN WAR BY ARCHITECTURAL AND DESIGN MEANS

RUSANOVA I.V.¹, *Cand. of Architecture, Assoc. Prof.*,
ZAKHAROVA S.O.², *Cand. Sc. (Philosophical Sciences), Assoc. Prof.*,
RYJOVA I.S.³, *Dr. Sc. (Philosophical Sciences), Prof.*,
KHARCHENKO K.S.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department "Design" National University "Zaporizhzhia Polytechnic", 64, Zhukovsky Str., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (067) 856-37-02, e-mail: i.rusanova2018@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-8496-6109

² Department "Design" National University "Zaporizhzhia Polytechnic", 64, Zhukovsky Str., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (067) 283-17-87, e-mail: arconzp@meta.ua, ORCID ID: 0000-0002-6952-2558

³ Department "Design" National University "Zaporizhzhia Polytechnic", 64, Zhukovsky Str., Zaporizhzhia, 69063, Ukraine, tel. +38 (067) 688-21-34, e-mail: 17design2017@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9562-200X

⁴ Department of Design and Reconstruction of the Architectural Environment, Ukrainian State University of Science and Technologies, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-93-37, e-mail: poliushkin.serhii@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-4740-7652

Abstract. Problem statement. The article is based on a collective study of the national memorial practice to perpetuate the events of the Russian-Ukrainian war with the involvement of experience in the implementation of similar memorial objects from world practice. Memorial complexes are considered in the context of historical, cultural and collective memory. The importance of architectural and design tools as an artistic language of memorialization is asserted, capable of creating not only a form, but also to give symbolism, evoke certain moods and emotions. The role of memorials in the formation of national identity, social consciousness of the people is highlighted. **The purpose of the article.:** to identify current trends and new approaches in memorializing the events of the Russian-Ukrainian war by means of architecture and design based on the transformation of ideological institutions of society, the formation of its historical and collective memory, national identity. Methodology: the study involves comparison, analysis and synthesis of the world and Ukrainian experience of memorialization of war events in the historical and cognitive aspects. **Conclusion:** the realization of ideas, ideas, concepts and symbols of architects and designers, as generators, the leading link in the unity of many specialists involved in the creation of modern memorials, can become an effective tool for creating a new historical identity of the people, based on the material embodiment of collective memory and national traditions. Scientific novelty: an analysis of artistic means of architecture and design was carried out on three types of memorials to identify their features and implementation in time. Memorials are considered in the aspect of historical, cultural and collective memory. The role of memorials in the formation of Ukrainian identity and ideological trends of society is substantiated. Practical significance. The practical value of this research lies in its potential to create a material component of the new national identity of the Ukrainian people.

Keywords: memorial practice; memorial objects; commemoration; architectural and design means; historical, cultural, collective memory; identity

Постановка проблеми. Вже понад десять років триває російсько-українська війна. За цей період відбулося і відбувається багато подій трагічних і переможних, що творять історію України в її боротьбі за незалежність і суверенітет. Ця війна, як і кожна в історії людства, супроводжується багатьма жертвами: людськими життями, фізичними та психологічними травмами, руйнуваннями міст і селищ, але також і героїчною стійкістю і незламністю народу, що бореться. Перед суспільством постає актуальна проблема меморіалізації цієї

війни, де важливе місце посідає створення меморіальних комплексів: військових поховань, окремих меморіалів для увічнення подій війни, а також меморіалів, присвячених повоєнному відновленню наших міст. Формування художнього образу цих об'єктів мовою архітектурно-дизайнерських засобів спостерігаємо у поки що нечисленних пропозиціях і реалізованих проєктах. Меморіальні проєкти розглядаються в процесі їх діалектичного розвитку, де проходять стадії становлення на рівні ідей і концепцій, реалізації, змін у

майбутньому. В цьому аспекті формуються завдання щодо нових підходів і сучасних тенденцій розвитку цих об'єктів, які є актуальними вже сьогодні, на початковому етапі практики меморіалізації подій війни.

Аналіз публікацій. В основу дослідження покладено вагому джерельну базу, яка складає теоретичне підґрунтя порушеної теми. Використані роботи науковців-дослідників, істориків, філософів, соціологів, які в науковій літературі можна вважати «класичними». Серед них – А. Ассман, яка пов'язує культурну пам'ять з індивідуальними спогадами [1], французький філософ і соціолог М. Хальбвакс, [2], його співвітчизник історик П. Нора, автор монументального видання «Місця пам'яті» [3], англійський дослідник П. Коннертон, що досліджував тему соціального виміру пам'яті [4]. Багато публікацій останніх років поглиблюють дослідження феномену пам'яті, серед яких пропонувався ціннісний підхід до історичної пам'яті, як джерела пізнання соціального життя [5]. Події російсько-української війни, віддзеркалені в меморіальних об'єктах, спонукали звернутися до історії російсько-українських стосунків [6], критики культурної спадщини Другої світової війни [17] [7] та трансформації ідеологічних напрямків у суспільстві [8]. Звернення до статей, що розглядають меморіальні комплекси в аспекті формування національної ідентичності, [9; 10], цілісності міського простору, часовому вимірі [10–12] дозволив подивитися на порушену проблему з точки зору різних факторів.

Ідеологічну основу дослідження складають праці істориків, соціологів, професійних фахівців з питань національної пам'яті, представників державних структур та місцевих громад. Факторологічний матеріал статті зібраний з останніх публікацій, міжнародних конференцій, круглих столів, аудіо та відео матеріалів, архітектурно-дизайнерських проєктів України та світу.

Мета статті: виявити сучасні тенденції та нові підходи в меморіалізації подій російсько-української війни засобами

архітектури та дизайну на основі трансформації ідеологічних установ суспільства, формування його історичної та колективної пам'яті, національної ідентичності. Для досягнення мети пропонується застосувати детальний аналіз літературних, архівних документів, медіа джерел, концептуальних та реалізованих проєктів, в яких висвітлюються сучасні тенденції меморіалізації подій російсько-української війни теперішнього та майбутнього часу.

Методологія передбачає застосування порівняльного методу, методів аналізу і синтезу. Поєднання кейс-стаді та якісного контент-аналізу у детальному вивченні конкретних меморіальних проєктів з одночасним аналізом супровідних матеріалів для виявлення закономірностей та тенденцій; історичний та когнітивний методи з урахуванням етичних аспектів – поваги до пам'яті загиблих та переживань постраждалих, та міждисциплінарності – необхідності залучення знань з архітектури, дизайну, історії, соціології, психології та культурології, надає можливість виявлення та інтерпретації отриманих даних для створення нових підходів.

Результати досліджень. Події російсько-української війни на сучасному етапі історії України викликали великий суспільний запит на меморіалізацію цих подій, вшанування пам'яті жертв і героїв війни. Як показує історія і світовий досвід, практики меморіалізації зазвичай з'являються після завершення подій, після їх усвідомлення і осмислення, згідно з ідеологічними установами соціуму і політикою держави. Але сьогодні проблема меморіалізації війни полягає в її тягlostі, невизначеності прикінцевих наслідків подій. Водночас, виклики війни вже зараз ставлять завдання вибудувати певні засоби, адекватну мову меморіалів, їх заглиблення в контекст. З цих питань відбуваються численні дискусії, влаштовуються круглі столи, презентації серед причетних до творчого процесу висвітлення подій війни.

Цей суспільний дискурс є відголоском на потребу системної і скоординованої

державної політики увічнення російсько-української війни. Наразі на загальнодержавному рівні обговорюється проєкт Закону України «Про засади державної політики національної пам'яті українського народу». Ключовим орієнтиром в цьому документі державної стратегії є «національна пам'ять», що є основною функцією, метою і завданням меморіальних об'єктів. Серед численної кількості учасників процесу меморіалізації, що визначають її зміст, провідне місце належить архітекторам і дизайнерам, які є втілювачами творчого задуму і реалізації проєкту. Архітектурні проєкти меморіалів із впровадженням певних ідей і концепцій, розробленням композицій, вписаних у середовище, супроводжуються дизайнерськими рішеннями у створенні разом з архітекторами художнього образу, організації простору і деталями в художній формі і з відповідною символікою. Часто архітектор виступає в ролі дизайнера і навпаки, деколи дизайнерські рішення впливають на цілісний архітектурний задум. Можна стверджувати, що архітектурні і дизайнерські засоби – невід'ємні складові художньої мови меморіалів, їх матеріальні характеристики. Окрім матеріальних характеристик існують і нематеріальні, рисами яких є звичаї, форми показу і вираження, культурні простори, традиції, які визнані спільнотами та групами як частина їх культурної спадщини [11]. Глибинний сенс меморіальної політики міститься в таких поняттях, як «історична», «культурна», «колективна», «національна пам'ять». Ці поняття фігурують в багатоаспектних і полідисциплінарних наукових дослідженнях істориків, соціологів, філософів.

«Класичні» праці дослідників пам'яті та їх подальші інтерпретації в роботах, статтях, публікаціях науковців становлять теоретичне підґрунтя сучасної меморіальної практики. Меморіальні об'єкти як втілення соціокультурної пам'яті спільноти певних часів, розглядається крізь призму історичних процесів, де є місце ретрансляції об'єктів минулого, відтворення їх у сучасності і прогнозування у майбутнє. З цієї точки зору

меморіальні практики трактуються, як універсальний механізм культурної трансформації найзначнішої інформації від одного покоління носіїв певної культури до іншого» [9]. Така трансформація обумовлена діалектичною природою розвитку пам'яті, коли руйнуються старі стереотипи і створюється новий пласт колективної пам'яті. Всі види пам'яті (історична, культурна, колективна) пов'язані зі складним і багатофакторним процесом формування національної ідентичності. Важливим фактором впливу на ідентичність і водночас її проявом є культурно-історична спадщина, зокрема меморіали з їх державною символікою, церемоніями і ритуалами, з ними пов'язаними. Відносно архітектурних творів в науковій літературі зустрічається термін «інтегральна ідентичність», що інтерпретується, як система поєднання ідентичності архітектора-творця і архітектурного твору в його інтегральних ознаках: функції, матеріалі, конструкції, стилістичних символіках, композиції [12]. Нова ідентичність за нинішніх умов жорстокої війни з російськими окупантами має базуватися на очищенні від матеріальної ідеології радянської доби, і, перш за все – Другої світової війни, переосмисленні політики її меморіалізації. Безумовно неприйнятними зараз є шаблони стереотипів меморіалів, їх надлишкова масштабність і глорифікація героїв.

Меморіали Другої світової війни, виконані у художніх формах соцреалізму, розраховані на зовнішнє їх сприйняття, знеособлення окремої людини і прославлення радянської держави. Відношення до знесення таких меморіалів неоднозначне у суспільстві. Адже монументи із зображенням фігури воїна України, що віддав життя в боротьбі з нацизмом, переходять нам у спадок і потребують інтеграції у новий трансформований простір. «Для об'єктів і місць історико-культурної спадщини треба шукати можливості відновлення у сфері етнонаціональної пам'яті, людиноцентризму і гуманізму» [7]. В сучасних умовах, коли російсько-українська війна – реальність і

жива рана, постають питання – як відобразити події війни засобами мистецтва, знайти нові підходи до створення меморіалів і їх реалізацію у часі? З тих питань існує багато думок, пропозицій, теоретичних та практичних напрацювань. Серед варіантів комеморації цієї війни названо різні форми – тактична і стратегічна [12]. До тактичної форми можна віднести те, що відбувається негайно і зараз, тобто те, що за висловом очільника Інституту Національної пам'яті А. Дробовича є «живим нервом свого часу» і віддзеркалюється у стихійних пам'ятниках, меморіальних таблицях, тимчасових виставках. Стратегічна форма, на думку авторів, потребує матеріалізації меморіалів тільки після перемоги і націлена у майбутнє. В цьому сенсі мистецькі засади як інструмент художнього виразу сполучає ці дві форми комеморації. «Меморіал, спричинений подіями минулого, споруджений у сьогоденні, більше за будь-який тип архітектури, спрямований у майбутнє» [10]. Станом на зараз меморіальна практика, що висвічує події російсько-української війни, робить ще перші кроки, закарбовані у нечисленних реалізаціях, концептуальних і конкурсних проектах. На основі цих напрацювань, світового досвіду і спираючись на науково-теоретичну базу досліджень авторами виділено три види об'єктів:

- військові меморіальні об'єкти, місця поховань;
- окремі монументи, скульптурні композиції;
- пам'ятні місця – місця подій, битв, руйнувань.

Ці меморіальні об'єкти вирізняються своєю спеціалізацією, особливістю застосування художніх засобів архітектури і дизайну, організацією простору у міському середовищі, реалізацією у часі.

Військові меморіальні об'єкти – місця поховань.

Національний військовий меморіал загальнодержавного значення – військове кладовище на Київщині у с. Гатному (рис. 1). Цей ескізний проект мав стати взірцем для вітчизняної меморіальної

практики і закласти традиції увічнення пам'яті захисників і захисниць України. Не вдаючись до опису самого проекту, зосередимо увагу на основних сучасних підходах, до яких вдаються архітектори і дизайнери, інтерпретуючи трагізм національної травми і вшанування пам'яті загиблих.



а



б



в, г

Рис. 1. Національний військовий меморіал на Київщині: а) план, б) вхід, в) колумбарій, г) будинок трауру

Ці підходи простежуються у планувальній організації меморіалу, яку складають:

- Розширена інфраструктура для різних функцій у вигляді: музейно-виставкових споруд, будинків трауру, колумбаріїв та інших об'єктів для організації поховань.

- Інклюзивні простори для громадських заходів, церемоній і ритуалів, а також місця для індивідуальних рефлексій, місць зустрічі побратимів і сімей загиблих.

- Універсальні місця поховань, у надмогильних надгробках переважно у вигляді козацького хреста, що на думку фахівців, є символом української військової культури, незалежно від національності і релігійних переконань полеглих.

Не маючи цілісної політики меморіалізації, творці Національного військового меморіалу надихалися прикладом Арлінгтонського кладовища – епіцентру пам'яті воїнів США, загиблих ще за часів війни за незалежність. Архітектурно-художні засади Арлінгтонського меморіалу стали своєрідним дороговказом для українських фахівців. По-перше – це основна ідея, закладена в американський меморіал і співзвучна Україні – «Перемога свободи над рабством», по-друге – універсальність поховань, коли могили офіцерів і солдатів отримали єдиний дизайн, що стверджує філософію рівності, або, по-іншому, – «демократію смерті» [14].

Досвід Арлінгтонського кладовища дає усвідомлення кінцевого результату-перетворення Національного військового меморіалу у цілісний комплекс – заповідник з виховною і пізнавальною функціями, де майбутні нащадки, не будучи свідками і носіями спогадів про війну, можуть вивчати історичні події, надихаючись почуттям патріотизму і спостерігаючи за культурою поховань, варту наслідування із зарубіжної в українську меморіальну практику.

Військовий меморіал у Львові, на відміну від Національного військового кладовища на Київщині, має свою історичну наступність, що починається ще з часів. Першої світової війни, коли на місці майбутнього меморіалу, відомого під назвою «Марсове поле», існував

австрійський цвинтар, який знищила радянська влада, пристосувавши його під захоронення загиблих у Другій світовій війні. Сьогодні Марсове поле, де щодня ховають захисників України, потребує перетворення у військовий меморіал. У проєкті, відібраному із конкурсних пропозицій на цей меморіал, що зображений на рис. 2 пропонується поділ поля кладовища на зони, що викликають різні настрої і почуття: *аванзона, з якої починається емоційна підготовка до меморіалу; кульмінаційні моменти – в скульптурних композиціях, будівлях, вписаних у композиційну побудову; фінальні, що дають почуття спокою і віри, шану до культу військової служби* [15].



Рис. 2. Конкурсний проєкт військового меморіалу у Львові



Рис. 3. Національне кладовище Флері-деван-Дуомон

Символічне значення архітектурно-дизайнерських засобів, до якого прагнуть творці меморіалів, можемо аналізувати на прикладах світового досвіду. Одним з найвидатніших з них є Національне кладовище Флері-деван-Дуомон у Вердені, створене у 1923 році на місці наймасштабніших і найкривавіших битв. Тут відчувається масштаб війни і трагедії, нею спричиненої. Від поля, засіяного хрестами

височить «Вежа мертвих», що символізує маяк, промінь світла якого вночі обходить старе поле битви, над яким звучить дзвін Перемоги (рис. 3).

В більшості військових меморіалів символічне значення надається могилі невідомого воїна, яку деякі вважають проявом «радянщини», а інші – відсутністю персоналізації. Але, насправді, важливо усвідомити, що пам'ять про невідомих борців, в яких би формах меморіалізації вона не проявлялась, є спільним образом тих, хто загинув в нинішній і давніших війнах і хто достойний вшанування.

Останнім часом до художньої мови військових меморіалів долучається віртуальна складова у вигляді власних сайтів з необхідною інформацією, які встановлюються на могилі кожного з полеглих, демонструються відео і аудіоподкасти, у спорудах комплексу. Один з найбільших віртуальних військових меморіальних комплексів створюється у Канаді, а в українському просторі на платформі пам'яті «Меморіал» також розвивається цифровий напрям. Створений «Цифровий меморіал героям і жертвам російсько-української війни» творить нову культуру пам'яті, у фокусі якої конкретні люди та їхні історії [9]. Наявні веб-ресурси фіксують у Лук'янівському історико-меморіальному заповіднику у Києві і у Львівському Личаківському цвинтарі. Завдяки таким ресурсам є можливість пошуку інформації про загиблих героїв, що сприяє їх персоналізації.

Окремі монументи, скульптурні композиції.

Монументальна інсталяція «Хрест героїв» у Вишгороді – приклад сполучення архітектурно-дизайнерських засобів з новітніми технологіями із застосуванням світло та аудіо ефектів (рис. 4). Меморіал являє собою геометричну композицію з чотирьох призматичних елементів з ломаною дзеркальною поверхнею, де закладена ідея козацького хреста. В інсталяцію інтегровано світловоди, створюючи ефект внутрішнього мерехтіння [15]. В художньому образі меморіалу закодовані певні сенси: з одного

боку, вони символізують людей, які пішли у світло, з іншого – перемогу світла, яке здатне перемагати більшу за нього темряву. Доповнює інсталяцію аудіальний канал, що відтворює звуки природи усіх регіонів України.



Рис. 4. Монументальна інсталяція «Хрест героїв» у Вишгородському парку

Новий підхід до меморіалу полягає в тому, що він демонструє взаємодію людини з комплексом, роблячи її не тільки спостерігачем ззовні, а безпосереднім учасником.



Рис. 5. Монумент «Воля» в Ірпені на Київщині

Монумент «Воля» в Ірпені присвячений героїчному супротиву міста проти російських загарбників. Ця скульптурна композиція, виготовлена із уламків ворожих ракет на честь стійкості і незламності народу, що переборює знаряддя вбивчої сили (рис. 5).

Монумент символізує, що цього «металу замало, щоб зламати нашу волю» - такий напис викарбовано на скульптурі. Особливістю цього монумента є електронна

«Книга пам'яті», що має увіковічити історії загиблих.



Рис. 6. Меморіал «Великий перелом» на місці зруйнованого моста (проект)

Меморіал «Великий перелом» – це концептуальний проєкт історико-архітектурного комплексу навколо зруйнованого моста в Ірпені, де показано, як мешканці ховаються під зруйнованим мостом (рис. 6). Потреба відрефлексувати подію довкола цього місця відображена в ідеї авторів – зберегти зруйновану конструкцію моста, зробивши її центром меморіалу поруч з побудованим пішохідним мостом.

Оглядові майданчики на мосту дають змогу відвідувачам відчувати місце подій, про яке нагадуватимуть і матеріали – бетон і зруйновані опори моста. До створення меморіалів пам'яті цивільних жертв в Ірпені і Бучі залучилися і зарубіжні фахівці. Так, один з проєктів виконав чилійський архітектор Крістіан Віттіг, який запропонував концепт-ідею дворівневого меморіалу, де на поверхні – дерев'яні стели з вівтарями, а в підземній частині – галерея

«Притулок пам'яті», прохід до якої має нагадувати вирву від вибухівки (рис. 7).



Рис. 7. Проєкт меморіалу «Притулок пам'яті» у місті Буча на Київщині

Наведені приклади з проявом нових підходів до меморіалів вирізняються серед численних менш відомих меморіальних об'єктів, встановлених останнім часом в містах і селищах і виконаних у звичних традиційних формах – плит, стел, портретних скульптур, більш зрозумілих широкому загалу. Переважно це притаманно пам'ятникам конкретним особам або реальним подіям – як от скульптурам Герою України, розстріляному за слова «Слава Україні» - Олександрові Мацієвському, або чутливій історії про воїна, що рятує дівчинку. Отже, слід визнати, що прикметою нашого часу є факт існування різних форм меморіалів, зокрема і стихійних, як прояв реакції людей на події війни [16].

Пам'ятні місця – місця подій, битв, руйнувань.

Місця, де проходили запеклі бої, відбувалися значні події і масова загибель людей, руйнування міст, пов'язані з реальними фактами, увічнення яких у меморіалах зазвичай розтягується на довгі роки і десятиріччя. Згодом, такі локації пам'яті стають місцями масового паломництва і туристичних маршрутів, викликаючи у відвідувачів почуття співпереживання, співчуття, усвідомлення трагічності подій.

На теренах України таких «місць пам'яті» з минулих часів є багато. Найвідоміший з них – Бабин яр – місце Голокосту, другий – місце жертв масових репресій у с. Биківня. Трагедія цих місць

може порівнюватися із злочинними «таборами смерті» Аушвіц, Бухенвальд, Дахау та іншими місцями трагічних подій. Пам'ять про історичні події існує у місцях, де не встановлені меморіали, а зберігаються атрибути цих подій – як от, так звані, «криївки» воїнів УПА в лісах західних областей України, або місця масових розстрілів євреїв, українських полонених, де встановлюються різної форми пам'ятні знаки. Потреба суспільства у збереженні пам'яті про місця значних подій знаходила відгук у кола зацікавлених фахівців, які шукали способи передати ту пам'ять. Прикладом може слугувати згадуваний Домонський склеп біля Вердена – місце жорстоких боїв і де ветерани цих боїв вважали, що руїни і деякі із вцілілих траншей можуть стати меморіалом. Другий приклад – американського Геттесбурга, який може вважатися одним із завершених меморіальних центрів на місці далеких битв громадянської війни, які лягли в основу увічнення величчя перемоги і тотальності втрат. Це поступово створюване «священне місто» перетворено зараз у меморіальний конгломерат із різнопрофільних частин, динамічних у своєму розвитку. Російсько-українська війна пов'язана з місцями жорстоких боїв, значущих переломних моментів війни: Іловайськ, Дебальцево, Авдіївка, Бахмут – далеко не повний їх список, який буде поповнюватися в ході цієї війни.

Збереження пам'яті про ці місця матеріалізується тепер шляхом встановлення пам'ятних знаків, цифрових меморіалів, або банерів з фотографіями загиблих, що нагадують колишні дошки пошани. Очевидна тимчасовість цих заходів гостро ставить питання про подальші способи меморіалізації місць подій, що змушує звертатися до художників, архітекторів і дизайнерів, розуміючи їх пріоритетну роль в цих питаннях. Одним із варіантів меморіалізації може бути ідея об'єднання маршрутами пам'яті місць бойових дій з індивідуальним вирішенням кожного із них у вигляді інтерактивного комеморативного простору з різноплановими меморіальними

об'єктами, аудіо і відео демонстраціями. Створення таких просторів в пам'яті стало би патріотичним актом, об'єднуючим суспільство. Тема пам'ятних міст розповсюджується і на міста Київщини – Бучу, Ірпінь, Гостомель, які перші в цій війні зазнали нелюдських дій російських окупантів проти мирних мешканців. Меморіалізація цих місць має свідчити про злочини міжнародного масштабу. Серед багатьох прикладів меморіальної практики не можна оминати увагою ті з них, що розповідають про масові руйнування наших міст. Якщо звернутися до досвіду Другої світової війни, то потреба зафіксувати ті події, на думку декотрих, полягала у збереженні руїн, які б були найкрасномовнішим меморіалом для мешканців.



Рис. 8. Інсталяція з уламків зруйнованих споруд на схилах і в металевих габіонах у парку акції «Буря» у Варшаві

Прикладом можуть бути європейські міста Дрезден і Варшава, які зазнали найбільших бомбардувань. Але в повоєнному відновленні цих міст наслідки руйнувань візуалізувалися іншими способами, як, наприклад, оригінальна експозиція, відкрита в 2004 році під назвою Парк акації «Буря», яка розповідає про відновлення Варшави з руїн. Із завалів зруйнованих споруд насипаний курган, на вершині якого майорить знак у вигляді якоря – знак Польщі, що бореться. Уламки руйнувань зібрані в металічні габіони з інформаційними стендами (рис. 8).

Нові підходи до художньої мови кожного з вищезгаданих типів меморіалів

спостерігаємо на прикладах втілених реалізацій і тих, що існують лише в проєктах. Матеріальні репрезентації подій війни у меморіальних об'єктах фіксують акти колективної пам'яті і роблять свій внесок у загальну справу боротьби за Україну.

Висновки

Російсько-українська війна актуалізувала питання меморіалізації як важливого аспекту формування національної пам'яті та ідентичності. Меморіальні практики, що виникають у відповідь на події війни, демонструють діалектичний розвиток: від негайних тактичних форм (стихийні пам'ятники, інсталяції) до стратегічних проєктів, орієнтованих на довготривале увічнення пам'яті у післявоєнний період.

Аналіз реалізованих та концептуальних меморіальних об'єктів в Україні засвідчив

зародження нових художніх підходів у архітектурі та дизайні меморіалів:

1. Орієнтація на людину, індивідуальні історії та персоналізацію пам'яті замість знеособлених монументальних форм радянської епохи.

2. Використання інтегрованих архітектурно-дизайнерських рішень для створення емоційно насичених просторів, які сприяють як колективному, так і особистому переживанню пам'яті.

3. Поява цифрових меморіалів та віртуальних платформ, що розширюють способи увічнення героїв війни.

4. Впровадження новітніх технологій (світло- та аудіоефекти) для посилення символічного навантаження меморіалів.

5. Поступова інтеграція світового досвіду меморіалізації, адаптованого до українських реалій (зокрема на прикладі Арлінгтонського військового кладовища).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ассман А. Простори спогаду. Форми трансформації культурної пам'яті пер. з нім. К. Дмитренко, Л. Доронічева, О. Юдін. Київ : Ніка – Центр, 2012. 440 с. URL: <http://magazines.rus.ru/nz/2005/2/ha2.html> (дата звернення : 2.08.2024).
2. Хальбвакс М. Коллективная и историческая память. *Неприкосновенный запас. Дебаты о политике и культуре*. 2005. № 2/3 (40–41). С. 2–27.
3. Нора П'єр. Теперішнє, нація, пам'ять пер. з фр. А. Рєпи. Київ : ТОВ «Видавництво «КЛІО», 2014. 272 с. URL: <http://magazines/nz/2005/2/nora22/html> (дата звернення : 2.08.2024).
4. Кеннертон Пол. Як суспільства пам'ятають пер. з англ. С. Шліпченко. Київ : Ніка – Центр, 2004. 184 с. (Серія «Зміна парадигми»). Вип. 7. ISBN 966-521-162-5 (Серія «Зміна парадигми»). URL: <http://litopus.org.ua>conert>conn> (дата звернення : 2.08.2024).
5. Ільїн В. В. Історична пам'ять із забуття: аксіологічний підхід. *Історична пам'ять про Другу світову війну: комплекс жертви : зб. наук. пр. за заг. ред. д. і. н., проф., чл.-кор. НАН України Кудряченка А. І.* Київ : ДУ «Інститут всесвітньої історії НАН України», 2023. С. 5–16.
6. Скульчик С. Імперія пам'яті. Російсько-українські стосунки в радянській історичній уяві. Переклад з англ. М. Климчук, Х. Чушак, Київ : Критика, 2008. 340 с.
7. Калакура О. Я. Історико-культурна спадщина, як цивілізаційна цінність і пріоритет етнонаціональної пам'яті українського народу. *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Київ, 25.05.2023.
8. Стасенко В. В. Зміна парадигми сучасного українського мистецтва внаслідок повномасштабної війни. Досвід реалізації мультидисциплінарного проєкту «ідентифікація війною». *Дизайн і мистецтво України у часи національного спротиву : тези доп. II Всеукр. наук. конф.* Київ, 04.04.2024. С. 43–45.
9. Кіслюк К. Меморіальний ландшафт української культури : минуле та сучасність. *Філософська думка*. 2016. № 3. С. 90–105.
10. Габрель Т. М. Меморіальні комплекси. Світовий досвід для практики формування політики пам'яті. *Art and Design*. 2021. № 1. С. 43–54.
11. Стадник М. М., Походзей І. І. Збереження культурної спадщини, як чинник формування національної ідентичності. *Проблеми ідентичності культурної спадщини України в умовах російсько-української війни та у повоєнний період : матер. Міжнар. наук.-практ. конф.* Київ, 25.05.2023. С. 297–300.
12. Черкес Б. С., Юрик Я. М. Ідентичність та пам'ять у міському середовищі. *Вісник Львівської політехніки*. 2014. С. 35–39. URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitsream/ntb/2595/1/7-35-39/pdf> (дата звернення : 4.08.2024).
13. Довгопалова О., Семенюк К. Є пам'ять стратегічна, а є тактична – про те, як пам'ятати війну сьогодні. URL: <http://suspilne/media/culture/502378-e-pamat-strategicna-a-e-takticna-oksana-dovgopol-ta-katerina-semenuk-pro-te-ak-pamatati-vijnu-sogodni/> (дата звернення : 2.08.2024).

14. Міністерство культури та інф. Політики України. Національна бібліотека України ім. Я. Мудрого. Інф. Центр з питань культури та мистецтва. Практики пам'ятання і меморіалізація: як гідно вшановувати героїв, жертв і події рос.-укр. війни (оглядова довідка за матер. преси та інтернету за 2022–2024 рр.). *Інформаційний дайджест*. Вип. 4,3. 2024.

15. Меморіал героїв України у Львові – результати конкурсу. URL: https://zaxid.net/u_lvovi_pokazhut_rezultati_vseukrayinskogo_konkursu_na_naykrashhiy_proekt_memorialu_geroyiv_n1583803_culture/502378-e-pamat-strategicna-a-e-takticna-oksana-dovgopol-ta-katerina-semenuk-pro-te-ak-pamatati-vijnu-sogodni/ (дата звернення : 4.08.2024).

16. Меморіалізація російсько-української війни : виклики і завдання. *Матеріали круглого столу 28.03.2024. Укрінформ*. URL: <http://www.ukraineinform.ua>rubrik-press/hall>3844788> (дата звернення : 4.08.2024).

REFERENCES

1. Assmann A. *Prostoru spohadu. Formy transformatsii kulturnoi pam'iaty* [Spaces of Memory. Forms of Transformation of Cultural Memory]. Kyiv : Nika-Centr Publ., 2012, 440 p. URL: <http://magazines.rus.ru/nz/2005/2/ha2.html> (accessed : 2.08.2024). (in Ukrainian).

2. Halbwachs M. *Kollektivna i istorichna pam'iat* [Collective and Historical Memory]. *Neprikosnovennyi zapas. Debaty o politike i kulture* [Inviolable Stock. Debate on Politics and Culture]. 2005, no. 2/3 (40–41), pp. 2–27. (in Ukrainian).

3. Nora P. *Teperishnie, natsiia, pam'iat* [Present, Nation, Memory]. Kyiv : KLO Publ., 2014, 272 p. URL: <http://magazines/nz/2005/2/nora22/html> (accessed : 2.08.2024).

4. Connerton P. *Yak suspilstva pam'iatayut* [How Societies Remember]. Kyiv : Nika-Centr Publ., 2004. 184 p. (Zmina paradyhmy). Iss. 7. ISBN 966-521-162-5. URL: <http://litopus.org.ua/conert/conn> (accessed : 2.08.2024). (in Ukrainian).

5. Iliin V.V. *Istorychna pam'iat iz zabuttia : aksiolohichni pidkhid* [Historical Memory from Oblivion : Axiological Approach]. In: Kudriachenko A. I. (ed.). *Istorychna pam'iat pro Druhu svitovu viinu : kompleks zhertvy* [Historical memory of the Second World War : the victim complex: collection of scientific works]. Kyiv : Institute of World History NAS of Ukraine, 2023, pp. 5–16. (in Ukrainian).

6. Yekelchik S. *Imperiia pam'iaty. Rosiisko-ukrainski stosunki v radianskii istorichnii uyavi* [Empire of Memory. Russian-Ukrainian Relations in Soviet Historical Imagination]. Kyiv : Krytyka Publ., 2008, 340 p. (in Ukrainian).

7. Kalakura O. Ya. *Istoryko-kulturna spadshchyna yak tsyvilizatsiina tsinnist i priorytet etnonatsionalnoi pam'iaty ukrainskoho narodu* [Historical and Cultural Heritage as a Civilizational Value and Priority of the Ukrainian People's National Memory]. *Materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi* [Materials of International Scientific-Practical Conference]. Kyiv, 25.05.2023. (in Ukrainian).

8. Stasenko V.V. *Zmina paradyhmy suchasnoho ukrainskoho mystetstva vnaslidok povnomasshtabnoi viiny* [Paradigm Shift in Contemporary Ukrainian Art Due to the Full-Scale War]. *Dyzayn i mystetstvo Ukrayiny u chasy natsional'noho sprotyvu : tezy dop. II Vseukr. nauk. konf.* [Design and Art of Ukraine in Times of National Resistance : II All-Ukrainian Scientific Conference]. Kyiv, 04.04.2024, pp. 43–45. (in Ukrainian).

9. Kisliuk K. *Memorialnyi landshaft ukrainskoi kultury : mynule ta suchasnist* [Memorial Landscape of Ukrainian Culture : Past and Present]. *Filosofska dumka* [Philosophical Thought]. 2016, no. 3, pp. 90–105. (in Ukrainian).

10. Habrel T.M. *Memorialni kompleksi. Svitovyi dosvid dlia praktyky formuvannia polityky pam'iaty* [Memorial Complexes. Global Experience for Memory Policy Practice]. *Art and Design*. 2021, no. 1, pp. 43–54. (in Ukrainian).

11. Stadnyk M.M. and Pokhodzei I.I. *Zberezhennia kulturnoi spadshchyny yak chynnnyk formuvannia natsionalnoi identychnosti* [Preservation of Cultural Heritage as a Factor of National Identity Formation]. *Problemy identychnosti kul'turnoyi spadshchyny Ukrayiny v umovakh rosiys'ko-ukrayins'koyi viyny ta u povoyennyi period : mater. Mizhnar. nauk.-prakt. konf.* [Problems of the Identity of the Cultural Heritage of Ukraine in the Conditions of the Russian-Ukrainian War and in the Post-war Period : materials of the International scientific-practical conference]. Kyiv, 25.05.2023, pp. 297–300. (in Ukrainian).

12. Cherkes B.S. and Yuryk Ya.M. *Identychnist ta pam'iat u miski seredovyshchi* [Identity and Memory in Urban Environment]. *Visnyk Lvivskoi politekhniki* [Bulletin of Lviv Polytechnic]. 2014, pp. 35–39. URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/2595/1/7-35-39.pdf> (accessed : 4.08.2024).

13. Dovhopalova O. and Semeniuk K. *Ye pamiat stratehichna, a ye taktichna – pro te, yak pamiataty viinu sohodni* [There Is Strategic Memory and Tactical Memory – How to Remember the War Today]. URL: <http://suspilne/media/culture/502378-e-pamat-strategicna-a-e-takticna-oksana-dovgopol-ta-katerina-semenuk-pro-te-ak-pamatati-vijnu-sogodni/> (accessed : 2.08.2024). (in Ukrainian).

14. *Ministerstvo kultury ta informatsiinoi polityky Ukrainy. Natsionalna biblioteka Ukrainy im. Yaroslava Mudroho. Inf. Tsentr z pytan' kul'tury ta mystetstva. Praktyky pam'yatannya i memorializatsiya: yak hidno vshanovuvaty heroyiv, zhertv i podiyi ros.-ukr. viyny (ohlyadova dovidka za mater. presy ta internetu za 2022–2024 rr.)* [Ministry of Culture and Information Policy of Ukraine. National Library of Ukraine named after Ya. Mudryi. Inf. Center for Culture and Arts.

Practices of remembrance and memorialization : how to honor the heroes, victims and events of the Russian-Ukrainian war (review report based on press and Internet materials for 2022–2024)]. *Informatsiynyy daydzhest* [Information Digest]. No. 4.3, Kyiv, 2024. (in Ukrainian).

15. *Memorial heroyiv Ukrainy u Lvovi – rezultaty konkursu* [Ukrainian Heroes Memorial in Lviv – Competition Results]. Zaxid.net. URL: https://zaxid.net/u_lvovi_pokazhut_rezultati_vseukrayinskogo_konkursu_na_naykrashhiy_proekt_memorialu_geroyiv_n1583803 (accessed : 4.08.2024). (in Ukrainian).

16. *Memorializatsiia rosiisko-ukrainskoi viiny : vyklyky i zavdannia* [Memorialization of the Russian-Ukrainian War: Challenges and Tasks]. *Materialy kruhloho stolu 28.03.2024. Ukrinform* [Materials of Round Table. Ukrinform. 28.03.2024]. URL: <http://www.ukraineinform.ua/rubrik-press/hall/3844788> (accessed : 4.08.2024). (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 23.08.2025.

УДК 378.016

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.108.1197

ІНТЕГРАЦІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА ЦИФРОВИХ РІШЕНЬ У ПІДГОТОВКУ СТУДЕНТІВ ІНЖЕНЕРНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

САЗАНІШВІЛІ З. В.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,

МАЦЮК І. М.², канд. техн. наук, доц.,

ВЕРНЕР І. В.³, викл.,

ПОВАЛЯЄВА В. О.⁴, студ.

^{1*} Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», вул. Дмитра Яворницького, 19, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: sazanishvili.z.v@nmu.one, ORCID ID: 0000-0003-4138-9238

² Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», вул. Дмитра Яворницького, 19, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: matsiuk.i.m@nmu.one, ORCID ID: 0000-0002-0861-0933

³ Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», вул. Дмитра Яворницького, 19, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: verner.i.v@nmu.one, ORCID ID: 0000-0003-2427-3284

⁴ Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», вул. Дмитра Яворницького, 19, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: povaliaieva.v.o@nmu.one

Анотація. У статті досліджується вплив цифрових технологій на сучасний навчальний процес та їхнє значення у формуванні нових методичних підходів до викладання. Особлива увага приділяється інтеграції цифрових освітніх платформ, використанню штучного інтелекту, адаптивного навчання та інноваційних мультимедійних ресурсів. Автори аналізують ключові переваги цифровізації освіти, серед яких персоналізація навчального процесу, підвищення рівня залученості студентів та оптимізація системи оцінювання знань. Також розглядаються можливі ризики, зокрема необхідність розвитку цифрових компетентностей викладачів, забезпечення кібербезпеки та адаптація освітніх матеріалів до швидкозмінного технологічного середовища.

Мета статті – аналіз сучасних освітніх технологій та методів, що застосовуються в умовах цифрової трансформації освіти. Особливу увагу приділено визначенню основних переваг і викликів використання цифрових інструментів у навчальному процесі. У статті також розглядаються перспективи вдосконалення педагогічних підходів з урахуванням інноваційних технологій та їх вплив на якість навчання. **Висновки.** Результати дослідження свідчать про те, що цифровізація освіти відкриває значні можливості для покращення навчального процесу, підвищення рівня залученості студентів та персоналізації освітніх програм. Разом із цим виявлено низку проблем, серед яких – необхідність вдосконалення цифрових компетентностей викладачів, забезпечення кібербезпеки та адаптація навчальних матеріалів під нові технології. З огляду на це, подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку оптимальних методик інтеграції цифрових технологій у навчальний процес, підвищення рівня цифрової грамотності педагогів та створення ефективних механізмів оцінювання впливу цифрових технологій на якість освіти.

Ключові слова: цифровізація освіти; цифрові технології; адаптивне навчання; цифрові освітні платформи; штучний інтелект; мультимедійні ресурси; персоналізація навчання; цифрова грамотність; оцінювання знань; методи викладання

IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE PRODUCTS IN THE EDUCATIONAL PROCESS OF MASTER'S TRAINING

SAZANISHVILI Z.V.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
MATSIUK I.M.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
VERNER I.V.³, *Teach.*,
POVALIAIEVA V.O.⁴, *Stud.*

^{1*} Department of Engineering and Generative Design, Dnipro University of Technology, 19, Dmitro Yavornitsky Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: sazanishvili.z.v@nmu.one, ORCID ID: 0000-0003-4138-9238

² Department of Engineering and Generative Design, Dnipro University of Technology, 19, Dmitro Yavornitsky Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: matsiuk.i.m@nmu.one, ORCID ID: 0000-0002-0861-0933

³ Department of Engineering and Generative Design, Dnipro University of Technology, 19, Dmitro Yavornitsky Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: verner.i.v@nmu.one, ORCID ID: 0000-0003-2427-3284

⁴ Department of Engineering and Generative Design, Dnipro University of Technology, 19, Dmitro Yavornitsky Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: povaliaieva.v.o@nmu.one

Abstract. This article examines the impact of digital technologies on the modern learning process and their role in shaping new methodological approaches to teaching. Special attention is given to the integration of digital educational platforms, the use of artificial intelligence, adaptive learning, and innovative multimedia resources. The authors analyze the key benefits of digitalization in education, including the personalization of the learning process, increased student engagement, and the optimization of assessment systems. Additionally, potential risks are considered, such as the need to develop digital competencies among educators, ensure cybersecurity, and adapt educational materials to the rapidly evolving technological environment. **The purpose** of this study is to analyze modern educational technologies and methods applied within the framework of digital transformation in education. Particular attention is paid to identifying the main advantages and challenges associated with using digital tools in the learning process. The article also explores prospects for improving pedagogical approaches by integrating innovative technologies and their impact on the quality of education. **Conclusions.** The research findings indicate that the digitalization of education opens up significant opportunities for enhancing the learning process, increasing student engagement, and personalizing educational programs. However, several challenges have been identified, including the need to improve educators' digital competencies, ensure cybersecurity, and adapt learning materials to new technologies. Given these findings, further research should focus on developing optimal methodologies for integrating digital technologies into the educational process, improving educators' digital literacy, and creating effective mechanisms for evaluating the impact of digital technologies on education quality.

Keywords: *education digitalization; digital technologies; adaptive learning; digital educational platforms; artificial intelligence; multimedia resources; personalized learning; digital literacy; knowledge assessment; teaching methods*

Постановка проблеми. З початку XXI століття технологічні досягнення вийшли на новий рівень, і штучний інтелект (ШІ) став одним із ключових інструментів, що впливають на всі сфери життя, зокрема на освіту. Розвиток комп'ютерних систем, глобальних мереж і технологій обробки великих даних створив передумови для впровадження складних інтелектуальних алгоритмів у різних галузях. Освіта, яка протягом тривалого часу базувалася на традиційних методах навчання, почала змінюватися з появою інноваційних цифрових інструментів. Онлайн-курси, інтерактивні платформи та програми для самонавчання стали звичними атрибутами сучасного освітнього середовища. Такі інструменти стали особливо популярними

під час пандемії COVID-19, коли дистанційне навчання стало основною формою отримання освіти. Проте найбільші зміни почалися з інтеграцією штучного інтелекту в навчальні процеси. Важливо відзначити, що перші спроби комп'ютеризованого навчання розпочалися ще в середині XX століття, проте лише в останнє десятиліття ШІ почав активно застосовуватися в освіті.

У сучасній освіті інновації на базі штучного інтелекту (ШІ) стають дедалі популярнішими, створюючи нові можливості для студентів, викладачів та адміністрації навчальних закладів [1]. Для передбачення майбутнього характеру вищої освіти, в якій ШІ є частиною навчального процесу в університетах, проводяться окремі

дослідження, в яких досліджуються основні виклики, що постають перед закладами вищої освіти та визначаються шляхи їх вирішення [2].

Аналіз публікацій. Дослідження проблем цифровізації освіти та впровадження новітніх технологій у навчальний процес набули значного поширення в наукових колах [1–6]. У багатьох роботах розглядається питання ефективності використання цифрових платформ та інструментів у навчальному процесі. Важливим етапом стало створення адаптивних навчальних систем, які дозволяють індивідуалізувати навчальний процес, що забезпечує більш ефективне засвоєння матеріалу студентами-матеріалознавцями та покращення результатів навчання [3]. Системи, які можуть адаптувати навчальний контент залежно від прогресу учня, змінюють сам підхід до навчання. Розширення функцій адаптивних навчальних систем стало ключовим елементом цієї трансформації.

Мета статті – аналіз сучасних освітніх технологій та методів, що застосовуються в умовах цифрової трансформації освіти. Особливу увагу приділено визначенню основних переваг і викликів використання цифрових інструментів у навчальному процесі. У статті також розглядаються перспективи вдосконалення педагогічних підходів з урахуванням інноваційних технологій та їх вплив на якість навчання.

Виклад матеріалу. Система Knewton використовує алгоритми для створення персоналізованих навчальних маршрутів, що дозволяє студентам вчитися за своїм темпом. Серед представлених на даній платформі курсів, цікавими для здобувачів спеціальності матеріалознавство можуть бути вивчення еластомерних матеріалів та термопластів, теплоємність матеріалів, а також основ статистичної обробки. Платформа у реальному часі аналізує відповіді студентів і адаптує контент, аби надати додаткові вправи на теми, що потребують більше уваги, та пропонує більш складні завдання для тих, хто демонструє високий рівень засвоєння матеріалу.

Наприклад, якщо студент має проблеми з розумінням властивостей еластомерів або процесів, що відбуваються під час обробки термопластів, Knewton [4] надає вправи та відеоматеріали, що допомагають покращити знання.

Платформа Brainly [5] є яскравим прикладом використання ІІІ для підтримки студентів з особливими потребами. Система аналізує їх запитання та пропонує індивідуалізовані рекомендації. Наприклад, для студента з дислексією Brainly може надати аудіо-версії текстів або візуалізацію інформації, що полегшує навчальний процес.

Для адміністраторів навчальних закладів ефективним інструментом під час планування навчальних програм, управління та комунікаціями між структурними підрозділами можна використовувати Classting. Окрім цього, дана система автоматизує розподіл домашніх завдань, контроль відвідуваності та полегшує спілкування між викладачами та студентами, а за необхідності, ще й батьками, знижуючи ймовірність пропусків завдяки автоматизованим нагадуванням про ключові дати навчального процесу.

Ще одним напрямком для впровадження ІІІ в освітній процес є розробка Chatbots. Системи з AI-Driven Chatbots стають популярними в навчальних закладах. Чат-боти дозволяють студентам швидко отримувати відповіді на запитання про графіки занять, терміни здачі робіт та курси, зменшуючи навантаження на адміністрацію. Наприклад, вони можуть допомогти з питаннями фінансової допомоги, знижуючи стрес під час реєстрації. Штучний інтелект також використовують для моніторингу психоемоційного стану студентів. Системи, що аналізують їхню поведінку, можуть виявляти проблеми, такі як стрес або вигорання, і пропонувати підтримку. Якщо спостерігається зниження активності, система може рекомендувати відпочинок або активність для зняття напруги, що сприяє загальному добробуту. Але розробка і впровадження чат-ботів на основі генеративного штучного інтелекту, найпопулярнішим з яких наразі є ChatGPT

[6], у сферу освіти стикається з кількома суттєвими викликами, найгостріший з яких, це проблема академічної чесності. Завдяки своїй здатності швидко генерувати відповіді на різні запитання та розв'язувати завдання, системи генеративного ШІ можуть бути використані студентами для виконання навчальних завдань замість самостійної роботи. Це створює серйозний ризик списування та обходу необхідного процесу власного мислення, що може призвести до зниження якості навчання. Надмірна залежність студентів від технологій також може негативно вплинути на їхню здатність самостійно досліджувати матеріал і критично його осмислювати. ШІ-асистенти можуть надати швидкі та прості відповіді, що може зменшити інтерес студентів до більш глибокого розуміння предмету. Якщо студенти починають частіше покладатися на готові рішення від ШІ, вони ризикують втратити мотивацію самостійно вивчати матеріал і розвивати критичне мислення. Це також може призвести до поверхневого засвоєння інформації, коли знання обмежуються короткими відповідями, без глибокого аналізу і комплексного розуміння теми. Також існує проблема об'єктивності та точності згенерованої інформації. Чат-боти на основі ШІ тренуються на великих обсягах даних із різних джерел, які не завжди є точними або актуальними. Через це студенти можуть отримувати неправильну, застарілу або навіть упереджену інформацію. У навчальному процесі це створює ризики для якості знань студентів, оскільки вони можуть прийняти таку інформацію за достовірну, не перевіряючи її.

Для вирішення цих проблем необхідне усвідомлення зміни подачі інформації під час аудиторних занять, впроваджувати завдання, які складніше автоматизувати, та розробляти інші способи контролю за виконанням завдань. Це, у свою чергу, змушує навчальні заклади змінювати підхід до оцінювання та шукати більш інтерактивні методи перевірки знань, такі як усні опитування чи практичні роботи, які вимагають глибокого залучення студента. Для викладачів важливо створювати умови, за яких студенти

розвиватимуть свої дослідницькі навички і будуть стимульовані до самостійного вивчення та критичного осмислення матеріалу. Викладачам доводиться навчати студентів перевіряти джерела та критично оцінювати інформацію, отриману від ШІ. Це стає важливим аспектом у формуванні інформаційної грамотності серед студентів та у підвищенні рівня їхньої здатності аналізувати і фільтрувати інформацію. Під час контролю робіт викладачі можуть використовувати системи оцінювання на базі ШІ, такі як Gradescope [7], допомагають викладачам швидше перевіряти роботи студентів, використовуючи автоматизовані алгоритми для оцінювання тестів і завдань з відкритими відповідями. Це дозволяє викладачам зосередитися на якісному зворотному зв'язку замість витрачання часу на рутинну перевірку, а також підвищити рівень виявлення використання ШІ в роботах. Аналогічно, платформа Turnitin [8] використовує алгоритми для перевірки плагіату. Такі продукти, як Gradescope і Turnitin можуть забезпечити та популяризувати академічну доброчесність серед студентів.

Іншими прикладами є освітні ігри, які використовують ШІ для створення адаптивних навчальних середовищ. Платформи, такі як Kahoot! [9] і Quizlet [10], дозволяють викладачам створювати інтерактивні тести та опитування, які підлаштовуються під рівень знань студентів, роблячи навчання більш цікавим, студентів – залученими у процес навчання, а самі заняття – інтерактивними. Окрім використання таких сервісів на заняттях під час поточної перевірки знань, інтерактивні ігри можуть використовуватися і в позанавчальних заходах студентського життя. Наприклад, програма Kahoot! використовувалася під час "Битви за Вищ", де студенти мали можливість змагатися у знаннях з різних предметів. Такі ігри допомагають студентам не лише засвоювати новий матеріал, а й розвивати навички командної роботи та критичного мислення.

Поряд з освітніми іграми, що додають навчальному процесу елемент

інтерактивності та мотивації, ефективними залишаються платформи з базою онлайн курсів. Так платформа Coursera [11] активно використовує алгоритми машинного навчання для рекомендацій курсів. Завдяки аналізу поведінки користувачів, вона пропонує навчальні програми, які відповідають інтересам та попереднім досягненням студентів. Це не лише покращує досвід навчання, але й допомагає їм фокусуватися на темах, які потребують особливої уваги. Наприклад, якщо студент виявляє інтерес до матеріалів і технологій їх обробки, платформа може порекомендувати курси, що охоплюють конкретні аспекти матеріалознавства.

Окремо слід розглянути використання технологій віртуальної та доповненої реальності (VR і AR), які відкривають нові горизонти для навчання. Наприклад, платформа, Labster [12], дозволяє студентам проводити віртуальні лабораторні експерименти з хімії, де вони можуть взаємодіяти з моделями молекул, симулювати хімічні реакції та вивчати процеси, які важко здійснити в умовах обмеженого доступу до фізичних лабораторій (рис. 1). Це особливо корисно для студентів, які навчаються дистанційно або в умовах, де можливості для практичних експериментів є обмеженими.

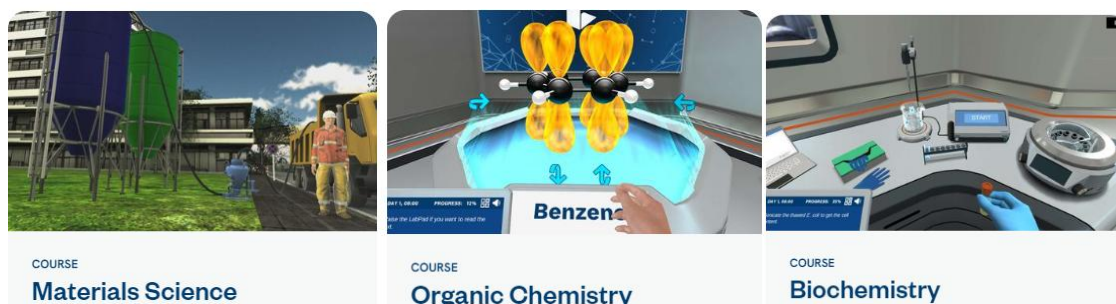


Рис. 1. Віртуальні лабораторні роботи на платформі Labster

В симуляції вбудовані тести з автоматичним оцінюванням, а педагоги можуть відстежувати прогрес і оцінювати результати через інформаційну панель Labster. Крім того, інші платформи використовують доповнену реальність (AR) для візуалізації складних хімічних

концепцій, що дозволяє студентам краще усвідомлювати навчальний матеріал. Ці технології допомагають покращити розуміння тем, таких як структура речовин, механізми реакцій та інші важливі аспекти хімії.

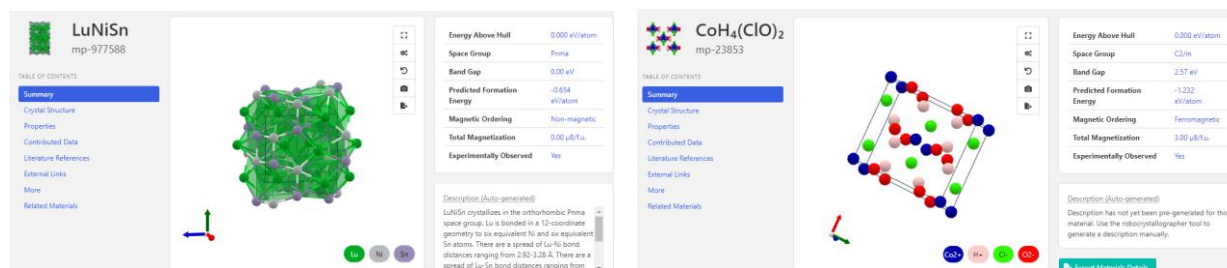


Рис. 2. Сторінка матеріалу на платформі The Materials Project

За допомогою ІІІ можна створювати бази матеріалів. Платформа The Materials Project використовує передові технології для надання студентам-матеріалознавцям доступу до бази даних із властивостями різних матеріалів. Завдяки інтегрованим інструментам для аналізу й моделювання, вона дозволяє користувачам досліджувати

такі параметри, як теплоємність, міцність, магнітні характеристики, та розглядати кристалічні структури в 3D (рис. 2). Це не лише допомагає студентам краще розуміти структуру матеріалів, але й сприяє підбору матеріалів для конкретних інженерних застосувань. Наприклад, якщо студент цікавиться матеріалами для

високотемпературних застосувань, The Materials Project може надати інформацію про відповідні матеріали й їх властивості для подальшого вивчення.

Платформа The Materials Project у базі має як вже відомі з'єднані, так і ще не синтезовані. Це дає змогу науковцям зосереджуватися на більш перспективних матеріалах для вирішення їх задач.

Висновки

Використання штучного інтелекту в освіті має значний потенціал для покращення якості навчання, проте воно також демонструє певні виклики, які потребують уваги. Одним із ризиків є можливість заміни реальної взаємодії між учнями та викладачами автоматизованими системами. Хоча ШІ здатний надавати зворотний зв'язок і оцінювати успішність, людський фактор у навчанні залишається незамінним, особливо в контексті розвитку емоційного інтелекту та критичного мислення. Ще однією проблемою є питання конфіденційності даних. Навчальні платформи збирають велику кількість інформації про учнів, що може призвести до витоків або неправомірного використання цих даних. Важливо забезпечити надійний захист приватної інформації та встановити чіткі норми щодо її обробки. Крім того, необхідно звернути увагу на етичні аспекти впровадження ШІ в освіту. Використання алгоритмів для автоматизованого оцінювання чи прогнозування успішності учнів може призвести до упереджень та дискримінації. Щоб уникнути таких проблем, слід впроваджувати прозорі механізми контролю та регулювання, які гарантуватимуть справедливості у процесі ухвалення рішень. Для успішного впровадження штучного інтелекту в освітній процес важливо підготувати викладачів до роботи з новими технологіями. Вони повинні бути навчені ефективно використовувати інструменти ШІ, щоб максимально розкрити його потенціал і забезпечити якісне навчання для студентів. Майбутнє освіти з

використанням штучного інтелекту залежатиме від здатності інтегрувати технології в навчальні процеси з дотриманням етичних норм і забезпечення прозорості. ШІ має стати інструментом для підвищення ефективності навчання, а не заміником людської взаємодії та креативності. Серед порад щодо майбутнього використання ШІ в освіті можна виділити необхідність постійного моніторингу результатів впровадження нових технологій, щоб коригувати підходи на основі отриманих даних. Важливо також активно залучати учнів до процесу навчання, заохочуючи їх до використання технологій на їх власних умовах, що може сприяти більш глибокому розумінню матеріалу та розвитку навичок критичного мислення.

Таким чином, технології ШІ, включаючи адаптивні навчальні системи, віртуальну реальність, чат-боти та інші інновації, суттєво змінюють систему освіти. Це дозволяє не тільки підвищити ефективність навчального процесу, але й створити більш інклюзивне та персоналізоване навчальне середовище, яке враховує потреби всіх студентів.

Таким чином, платформи для онлайн-навчання використовуються для персоналізації навчального процесу, надаючи студентам можливість вивчати матеріали у зручному для них темпі. Чат-боти служать для швидкої комунікації та отримання інформації про навчальні процеси, що зменшує навантаження на адміністрацію та полегшує доступ до важливих даних. Інтерактивні ігри та технології віртуальної реальності відкривають нові горизонти для залучення студентів до навчання та розвитку практичних навичок. Усі ці інновації разом сприяють покращенню якості освіти, але також ставлять перед нами виклики, які потребують спільних зусиль викладачів, адміністрацій та розробників для створення ефективних і етичних рішень, які зроблять навчання доступнішим та якіснішим для всіх здобувачів вищої освіти.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Chen L., Chen P. & Lin Z. Artificial Intelligence in Education : a review. IEEE Access. 2020. № 8. Pp. 75264–75278.
2. Popenici S. & Kerr S. Exploring the impact of artificial intelligence on teaching and learning in higher education. *Research and Practice in Technology Enhanced Learning*. 2017. № 12.
3. Huang J., Saleh S. & Liu Y. A Review on Artificial Intelligence in Education. *Academic Journal of Interdisciplinary Studies*. 2021. № 10. Pp. 206–206.
4. Knewton. Attention Required! Cloudflare. URL: <https://www.knewton.com/learn> (accessed : 07.11.2024).
5. Brainly. Brainly AI Tutor! URL: <https://brainly.com/> (accessed : 07.11.2024).
6. ChatGPT – чат GPT. ChatGPT. URL: <https://chatgpt.com/g/g-mzFm1dKjW-chat-gpt> (accessed : 07.11.2024).
7. Gradescope. Save time grading. Gradescope. URL: <https://www.gradescope.com/> (accessed : 07.11.2024).
8. Plagiarism Detector : Prevent Academic Misconduct. Turnitin. Plagiarism Detector : Prevent Academic Misconduct. Turnitin. URL: <https://www.turnitin.com/> (accessed : 07.11.2024).
9. Kahoot! Learning games. Make learning awesome! Kahoot! URL: <https://kahoot.com/> (accessed : 07.11.2024).
10. Quizlet. URL: <https://quizlet.com/latest> (accessed : 07.11.2024).
11. Coursera. Degrees, Certificates, & Free Online Courses. Coursera. URL: <https://www.coursera.org/> (accessed : 07.11.2024).
12. Labster. Virtual Labs for Universities and High Schools. Labster. Virtual Labs for Universities and High Schools. URL: <https://www.labster.com/> (accessed : 07.11.2024).

REFERENCES

1. Chen L., Chen P. and Lin Z. Artificial Intelligence in Education : a review. IEEE Access. 2020, no. 8, pp. 75264–75278.
2. Popenici S. and Kerr S. Exploring the impact of artificial intelligence on teaching and learning in higher education. *Research and Practice in Technology Enhanced Learning*. 2017, no. 12.
3. Huang J., Saleh S. and Liu Y. A Review on Artificial Intelligence in Education. *Academic Journal of Interdisciplinary Studies*. 2021, no. 10, pp. 206–206.
4. Knewton. Attention Required! Cloudflare. URL: <https://www.knewton.com/learn> (accessed : 07.11.2024).
5. Brainly. Brainly AI Tutor! URL: <https://brainly.com/> (accessed : 07.11.2024).
6. ChatGPT – чат GPT. ChatGPT. URL: <https://chatgpt.com/g/g-mzFm1dKjW-chat-gpt> (accessed : 07.11.2024).
7. Gradescope. Save time grading. Gradescope. URL: <https://www.gradescope.com/> (accessed : 07.11.2024).
8. Plagiarism Detector : Prevent Academic Misconduct. Turnitin. Plagiarism Detector : Prevent Academic Misconduct. Turnitin. URL: <https://www.turnitin.com/> (accessed : 07.11.2024).
9. Kahoot! Learning games. Make learning awesome! Kahoot! URL: <https://kahoot.com/> (accessed : 07.11.2024).
10. Quizlet. URL: <https://quizlet.com/latest> (accessed : 07.11.2024).
11. Coursera. Degrees, Certificates and Free Online Courses. Coursera. URL: <https://www.coursera.org/> (accessed: 07.11.2024).
12. Labster. Virtual Labs for Universities and High Schools. Labster. Virtual Labs for Universities and High Schools. URL: <https://www.labster.com/> (accessed : 07.11.2024).

Надійшла до редакції: 12.09.2025.

УДК 669.017:519.21

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.115.1198

ФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛІВ

СОЛОВЕЙ Д. В.^{1*}, асп.,

ШЕВЧЕНКО Д. П.², асп.,

ВЕРБА А. П.³, асп.,

СОКОЛЕНКО О. В.⁴, асп.,

ЗАГРУННИЙ В. С.⁵, асп.,

ІЛЬЄВ І. М.⁶, канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра матеріалознавства та обробки 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 (097) 334-75-88, e-mail: solovei.denis@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0003-7384-1222

² Кафедра матеріалознавства та обробки 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 (097) 334-75-88, e-mail: shvchenkod40@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-9325-8059

³ Кафедра матеріалознавства та обробки 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 (097) 334-75-88, e-mail: anverba@icloud.com, ORCID ID: 0009-0000-6689-6733

⁴ Кафедра матеріалознавства та обробки 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 (097) 334-75-88, e-mail: aleksey.stroycom@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-6609-9875

⁵ Кафедра матеріалознавства та обробки 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 (097) 334-75-88, e-mail: volchuk.volodymyr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0007-3634-6942

⁶ Кафедра прикладної математики та інформаційних технологій, 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) 76-96-99, e-mail: ilyev.ilya@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9515-7734

Анотація. Вступ. Дослідження впливу структури матеріалів на їх властивості являється важливою задачею матеріалознавства. Однак ця задача ускладнюється у зв'язку зі складною конфігурацією структурних елементів. Особливо це стосується ідентифікації структури маловуглецевих сталей, де продукти розпаду аустеніту – перліт, ферит, бейніт, мартенсит, гольчатий та відманштетовий ферит та інші відзначаються складністю будови і тому доволі часто описуються баловими оцінками. Для аналізу структури та властивостей маловуглецевої сталі 20 в роботі запропоновано застосувати фрактальний підхід. **Матеріали та методика.** Проведено дослідження мікроструктури маловуглецевої сталі 20 шляхом обчислення фрактальної розмірності її складових та розглянуто можливості застосування фрактальної розмірності для оцінки критеріїв якості сталі. **Результати експерименту.** У ході проведених досліджень було зафіксовано, що зі збільшенням фрактальної розмірності перліту з 1,64 до 1,82 у ферито-перлітній структурі сталі 20 в стані заводської поставки показники твердості та міцності та твердості також збільшуються. При збільшенні фрактальної розмірності фериту зі 1,75 до 1,93 збільшуються пластичні показники (відносне звуження та видовження). Побудовані математичні моделі залежності механічних властивостей сталі 20 від фрактальної розмірності ферито-перлітної структури. **Висновки.** Результати досліджень підтверджують, що фрактальна розмірність складових структури впливає на ряд механічних властивостей маловуглецевої сталі 20. В результаті проведених експериментів було встановлено, що зв'язок між фрактальною розмірністю перліту та механічними властивостями сталі коливається в межах коефіцієнта парної кореляції рівнянь регресії $R^2 = 0,65\text{--}0,88$. Зв'язок між фрактальною розмірністю фериту та механічними властивостями коливається в межах коефіцієнта парної кореляції рівнянь регресії $R^2 = 0,72\text{--}0,85$. Дані результати є важливим кроком в розробці неруйнівних методів контролю маловуглецевих сталей з ферито-перлітною будовою та дають змогу досліджувати нові зв'язки між структурою та властивостями металів.

Ключові слова: сталь 20; структура; механічні властивості; ферит; перліт; модель

FRACTAL ANALYSIS OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF METALS

SOLOVEI D.V.^{1*}, *Postgrad. Stud.*,
SHEVCHENKO D.P.², *Postgrad. Stud.*,
VERBA A.P.³, *Postgrad. Stud.*,
SOKOLENKO O.V.⁴, *Postgrad. Stud.*,
ZAHRUNNYI V.S.⁵, *Postgrad. Stud.*,
ILIEV I.M.⁶, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

^{1*} Department of Materials Science, 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) 334-75-88, e-mail: solovei.denis@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0003-7384-1222

² Department of Materials Science, 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) 334-75-88, e-mail: shevchenkod40@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-9325-8059

³ Department of Materials Science, 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) 334-75-88, e-mail: anverba@icloud.com, ORCID ID: 0009-0000-6689-6733

⁴ Department of Materials Science, 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) 334-75-88, e-mail: aleksey.stroycom@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-6609-9875

⁵ Department of Materials Science, 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) 334-75-88, e-mail: volchuk.volodymur@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0007-3634-6942

⁶ Department of Computer Sciences, Information Technologies and Applied Mathematics, 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) 76-96-99, e-mail: ilyev.ilya@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9515-7734

Abstract. Introduction. The study of the influence of the structure of materials on their properties is an important task of materials science. However, this task is complicated by the complex configuration of structural elements. This is especially true for identifying the structure of low-carbon steels, where the decomposition products of austenite – pearlite, ferrite, bainite, martensite, needle and Widmannstedt ferrite and others – are characterized by the complexity of the structure and therefore are quite often described by point estimates. To analyze the structure and properties of low-carbon steel 20, the work proposes to apply a fractal approach. **Materials and methods.** The microstructure of low-carbon steel 20 was studied by calculating the fractal dimension of its components and the possibilities of using fractal dimension to assess steel quality criteria were considered. **The results of the experiment.** In the course of the conducted research, it was recorded that with an increase in the fractal dimension of pearlite from 1.64 to 1.82 in the ferrite-pearlite structure of steel 20 in the factory delivery state, the hardness and strength and hardness indicators also increase. With an increase in the fractal dimension of ferrite from 1.75 to 1.93, the plastic indicators (relative narrowing and elongation) increase. Mathematical models of the dependence of the mechanical properties of steel 20 on the fractal dimension of the ferrite-pearlite structure have been constructed. **Conclusions.** In the course of the conducted research, it was recorded that with an increase in the fractal dimension of pearlite from 1.64 to 1.82 in the ferrite-pearlite structure of steel 20 in the factory delivery state, the hardness and strength and hardness indicators also increase. With an increase in the fractal dimension of ferrite from 1.75 to 1.93, the plastic indicators (relative narrowing and elongation) increase. Mathematical models of the dependence of the mechanical properties of steel 20 on the fractal dimension of the ferrite-pearlite structure have been constructed.

Keywords: steel 20; structure; mechanical properties; ferrite; pearlite; model

Вступ. Сучасні наукові дослідження в галузі матеріалознавства демонструють зростаючий інтерес до використання математичних методів для глибшого розуміння структури та властивостей матеріалів [1–3]. Однією з таких перспективних концепцій є теорія фракталів, яка дозволяє описати складні

багаторівневі структури, характерні для багатьох технічних і природних матеріалів [4–6]. Фрактальний підхід забезпечує нові можливості для кількісних характеристик мікроструктури матеріалів, шляхом зокрема визначення фрактальної розмірності фазових або структурних складових.

Фрактальна розмірність виступає як чутливий параметр, що здатен відображати ступінь неоднорідності, пористості чи зернистості матеріалу, що впливає на його механічні властивості – міцність, твердість, в'язкість тощо [7–9]. Таким чином, встановлена кореляція між фрактальними характеристиками мікроструктури та механічними властивостями відкриває шлях до створення нових, ефективних методів неруйнівного контролю матеріалів. Це має особливе значення для високотехнологічних галузей, де критично є забезпечення надійності без пошкодження об'єктів контролю [10–12].

У даній роботі розглядається потенціал застосування фрактальної геометрії для моделювання структури матеріалів та прогнозування їх механічних властивостей, що може стати основою для розробки інноваційних неруйнівних методів оцінки якості матеріалів.

Матеріали та методика. У якості об'єкта дослідження використовувався зразки сталі марки 20 у формі пластинок 30×20×50 мм, виготовлених з низьколегованої маловуглецевої. Сталь класу Ат400С, відповідно до вимог стандарту України 380-2005, характеризувалася певним хімічним складом, наведеним у таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад сталі 20 в %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As	Fe
0,14 – 0,22	0,05 – 0,15	0,40 – 0,65	до 0,30	до 0,05	до 0,04	до 0,30	до 0,30	до 0,08	Залишок

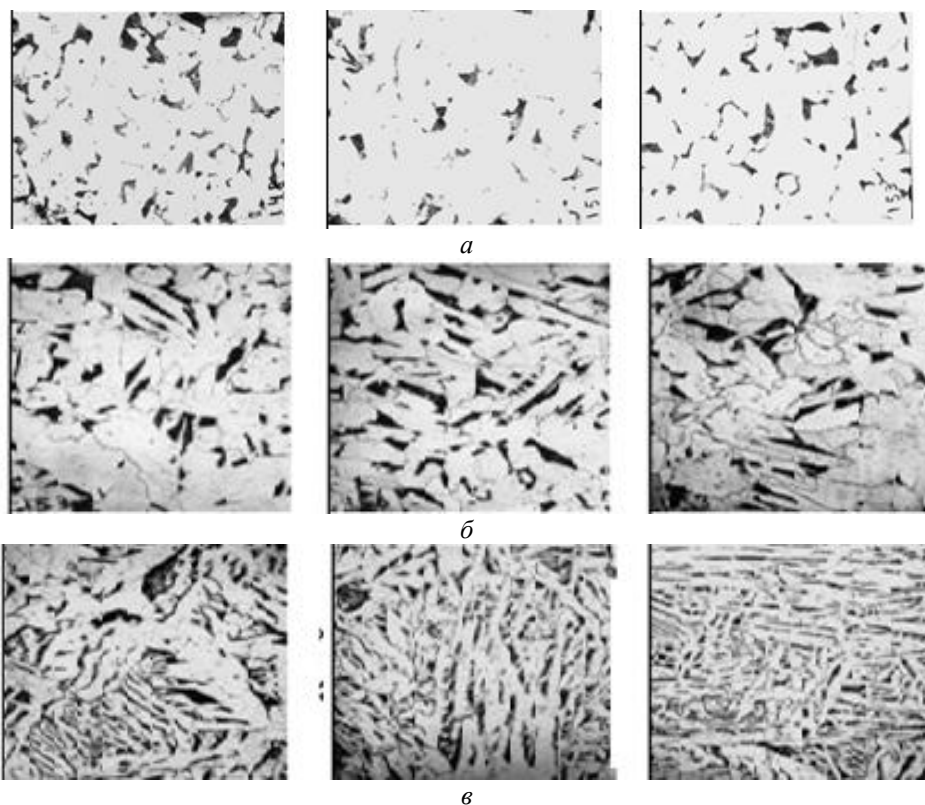


Рис. 1. Мікроструктура сталі 20 : а – в стані заводської поставки; б – нагрів до температури 930 °С з витримкою 30 хвилин і подальшим охолодженням у воді до 650 °С, в – нагрів до температури 930 °С, витримка протягом 30 хвилин з охолодженням в оливі

Для дослідження було відібрано зразки зі сталі 20 як у первісному стані поставки, так і після проведення термічної обробки відповідно до наступних технологічних режимів:

- термічна обробка, що передбачала нагрів до температури 930 °C з витримкою 30 хвилин і подальшим охолодженням у воді до 650 °C (що відповідає температурному діапазону перлітної області; реалізується дифузійний механізм перетворень);

- інший режим передбачав нагрів до тієї ж температури (930 °C), витримку протягом 30 хвилин, після чого охолодження відбувалося у оливі.

Дослідження мікроструктури сталі проводилися із застосуванням методів кількісного металографічного аналізу за допомогою мікроскопа «Неофот-2» (виробництва Німеччини).

Встановлено, що вміст перліту коливався в межах 7–20 %, решта об'єму займав ферит. У деяких зразках виявлено поодинокі зерна верхнього бейніту в кількості до 2–5 % (характерно для зразків у стані поставки або після часткового охолодження до 650 °C у воді). У разі охолодження в маслі формується структура типу ферито-бейніта.

Натурні випробування проводилися з метою визначення механічних характеристик матеріалу: межі міцності на розрив (σ_B), межі плинності (σ_T), твердості за Брінелем (HRB) та мікротвердості за Віккерсом (прилад ПМТ-3, навантаження 10 г) – окремо для феритної фази (HV10) та перлітної (HV10). Також оцінювалася ударна в'язкість КСЧ при температурі +20 °C. Усі випробування здійснювалися відповідно до чинних стандартів і методичних вказівок.

Результати експерименту. Фрактальна розмірність ферито-перлітної сталі 20 визначалася за класичною формулою **Хаусдорфа (або Хаусдорфа-Безіковича) для визначення фрактальної розмірності** використовується для оцінки того, наскільки складна або «дрібнодеталізована» геометрична структура при масштабуванні [13; 14]. Вона ґрунтується на покритті множини фігурами меншого масштабу.

Фрактальна (Хаусдорфова) розмірність множини D визначається як:

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log(1/\epsilon)}, \quad (1)$$

де $N(\epsilon)$ – мінімальна кількість ϵ розмірних елементів (наприклад, куль або квадратів), необхідних для покриття множини; $\log$ – логарифм, зазвичай натуральний або десятковий.

Формула Хаусдорфа для визначення фрактальної розмірності є одним із ключових інструментів у фрактальній геометрії, оскільки вона дозволяє кількісно описати складність геометричних об'єктів, що мають нерегулярну, самоподібну структуру.

У традиційній евклідовій геометрії розмірність фігур – це ціле число (наприклад, пряма – 1D, площа – 2D), однак у реальному світі більшість об'єктів не мають чіткої форми. Наприклад, хмари, гірські ландшафти, дерева, контури річок або зерна в металах – усі ці структури складні й не можуть бути адекватно описані звичайними геометричними мірками. Саме тут набуває вагу фрактальна розмірність, яка часто є дробовим числом і відображає рівень детальності об'єкта на різних масштабах.

Фрактальна розмірність допомагає описати, як змінюється структура об'єкта при масштабуванні, що важливо для моделювання гірських рельєфів, шорстких поверхонь, берегових ліній, хмар тощо.

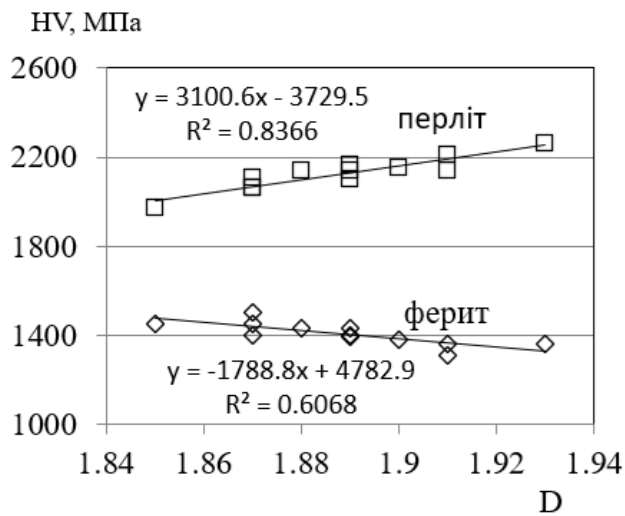
У матеріалознавстві фрактальний підхід застосовується для дослідження мікротріщин, розподілу зерен, пористості та інших морфологічних характеристик [15–17].

Хаусдорфова розмірність дозволяє кількісно оцінити ступінь неоднорідності та складності мікроструктури, що впливає на механічні властивості матеріалу [18–20].

Завдяки своїй здатності адекватно описувати структури, які виходять за межі класичної геометрії, формула Хаусдорфа є незамінною для аналізу й моделювання складних систем у природничих та інженерних науках [21; 22]. Вона надає універсальну мову для вивчення явищ, що

демонструють самоподібність і складність на різних масштабах.

На рисунку 2 наведені графіки залежності механічних властивостей сталі 20



від фрактальної розмірності фериту та перліту.

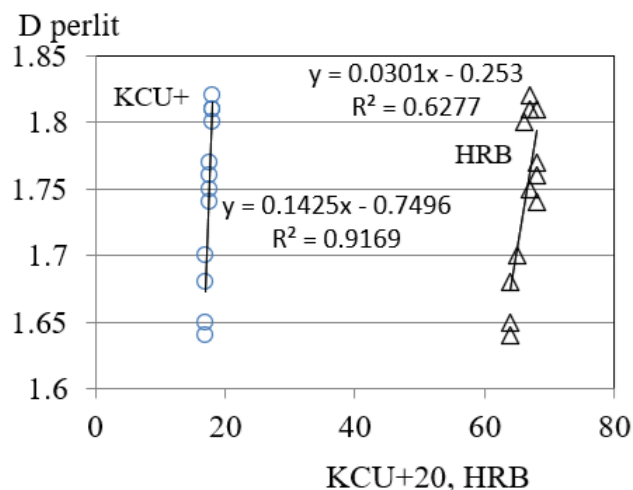
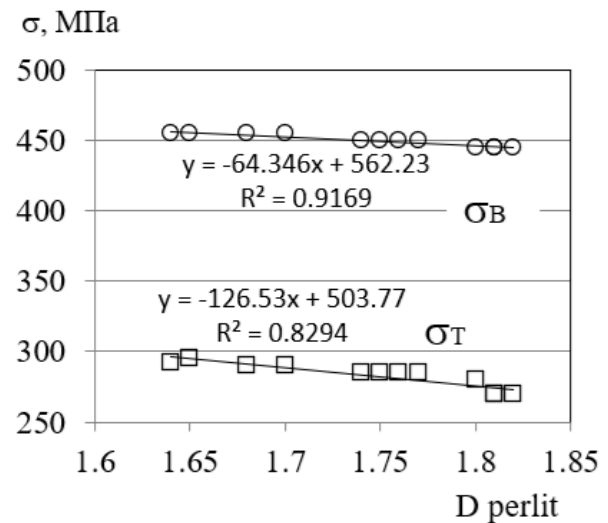


Рис. 2. Вплив фрактальної розмірності фериту і перліту на механічні властивості сталі 20

Отримані в ході дослідження результати мають вагоме прикладне значення, зокрема у сфері контролю якості металопрокатної продукції зі сталі марки 20. Застосування встановлених кореляційних залежностей дозволяє здійснювати непрямий контроль властивостей металу, що особливо важливо в умовах серійного або масового виробництва, де забезпечення швидкості та точності оцінки якості продукції є критичним.

Побудовані математичні моделі фрактального типу дають змогу прогнозувати механічні характеристики

сталі 20 (зокрема, міцність, твердість, ударну в'язкість тощо) без необхідності проведення повноцінних механічних випробувань.

Таким чином, використання фрактального аналізу у поєднанні з математичним моделюванням відкриває нові можливості для оптимізації систем технічного контролю якості, а також забезпечує більш гнучкий і технологічно адаптивний підхід до оцінювання властивостей конструкційних матеріалів.

Висновки

Проведено аналіз впливу ферито-перлітної структури маловуглецевої сталі 20 на механічні властивості шляхом застосування фрактального апарату. Такий підхід дозволив розробити неруйнівний метод контролю якості маловуглецевих сталей.

У ході дослідження було здійснено комплексний аналіз впливу ферито-перлітної мікроструктури маловуглецевої сталі марки 20 на її механічні властивості з використанням фрактального підходу до обробки металографічних даних. Застосування фрактального апарату дало змогу виявити

стійкі кореляційні зв'язки між структурними особливостями сталі та її механічними характеристиками.

На основі проведеного аналізу було запропоновано концепцію неруйнівного методу контролю якості маловуглецевих сталей, який ґрунтується на фрактальних параметрах мікроструктури. Такий підхід дозволяє здійснювати попередню оцінку експлуатаційних властивостей матеріалу без потреби в проведенні повномасштабних механічних випробувань, що забезпечує істотну економію часу та ресурсів на виробництві.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Hlushkova D. B., Bagrov V. A., Demchenko S. V., Volchuk V. M., Kalinin O. V., Kalinina N. E. Structure and properties of powder gas-plasma coatings based on nickel. *БАИТ*. 2022. № 4 (140). Pp. 125–130.
2. Uzlov O., Bolshakov V. Investigation of acicular ferrite structure in HSLA steel. *Proceedings of the "Materials Week 2002"*. Frankfurt : Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2002. Pp. 14–20. URL: www.irbis-nbuv.gov.ua/cgiirbis_64.exe?
3. Дубров Ю. И., Волчук В. Н., Большаков В. И. Применение экспертной информации при формировании активного эксперимента в материаловедении. *Моделирование и оптимизация в материаловедении : матер. к 40-й междунар. сем. по моделированию и оптимизации композитов*. Одесса : АстроПринт, 2001. С. 25–26.
4. Дубров Ю., Большаков В., Волчук В. Пути идентификации периодических многокритериальных технологий : монография. Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2015. 236 с. URL: <https://www.palmarium-publishing.ru/extern/listprojects>
5. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. О применении фрактального формализма при математическом описании структур. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2016. № 2. С. 26–33. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/27-33>
6. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. К вопросу о постановке задачи идентификации фрактальной структуры металла. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. № 5. С. 35–39. URL: <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/68905/63995>
7. Большаков В., Волчук В., Дубров Ю. Пути применения теории фракталов : монография. Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2016. 146 с.
8. Volchuk V., Dubrov Yu. Ways of compensation of incomplete formal axiomatics in identification of complex objects. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2018. № 4. С. 31–35. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.261218.31.562>
9. Gödel K. Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I. *Monatshefte für Mathematik und Physik*. 1931. Vol. 38, № 1. Pp. 173–198.
10. Большаков Вад. І., Большаков В. І., Волчук В. М., Дубров Ю. І. Часткова компенсація неповноти формальної аксіоматики при ідентифікації структури металу. *Вісник НАН України*. 2014. № 12. С. 45–48. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/73434>
11. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Материаловедческие аспекты применения частичной компенсации неполноты формальной аксиоматики. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2015. № 5. С. 10–16. URL : <http://visnyk.pgasa.dp.ua/article/view/47385/43497>
12. Mandelbrot B. B. The Fractal Geometry of Nature : monograph. Nev-Yuork, San Francisco : Freeman, 1982. 480 p. URL: <http://www.amazon.com/Fractal-Geometry-Nature-Benoit-Mandelbrot/dp/0716711869>
13. Zhuravel' I. M., Svir'ska L. M. Measurement of the mean grain size in a metal by using fractal dimensions. *Materials Science*. 2010. Vol. 46, № 3. Pp. 418–420.
14. Zhuravel' I. M. Computer Analysis of the Distribution of Grain Sizes in the Structure of 12Kh1MF Steel After Operation. *Materials Science*. 2019. Vol. 55. № 2. Pp. 187–192.
15. Bol'shakov V., Volchuk V., Dubrov Yu. Fractals and properties of materials : monograph. Saarbrücken : Lambert Academic Publishing, 2016. 140 p. URL: <https://www.lap-publishing.com/catalog/details/store/tr/book/978-3-330-01812-9/fractals-and-properties-of-materials?search=Fractals>

16. Bolshakov V. I., Volchuk V. M., Dubrov Yu. I. Regularization of One Conditionally III-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018. Vol. 40, № 9. Pp. 1165–1171. DOI: 10.15407/mfint.40.09.1165.
17. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Топологические и фрактальные инварианты структуры для оценки качества металла. *Доповіді НАН України*. 2017. № 4. С. 42–48. URL: <https://doi.org/10.15407/dopovidi.2017.04.00>
18. Волчук В. Н. Разработка и исследование метода определения качественных характеристик металла на основе анализа фрактальной размерности его микроструктуры : дисс. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук : 05.02.01. Днепропетровск, 2003. 186 с.
19. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Применение фрактального моделирования при оценке структуры и свойств металлов. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2018. № 1. С. 50–55. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.240418.50.105>
20. Volchuk V., Klymenko I., Kroviakov S., Orešković M. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism. *Tehnički glasnik – Technical Journal*. 2018. Vol. 12, № 2. Pp. 93–97. URL: <https://hrcak.srce.hr/202359>
21. Волчук В. Н. К вопросу о применении теории мультифракталов для оценки механических свойств металла. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2014. № 3. С. 12–19. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/12-19>
22. Волчук В. М. Модель оцінювання твердості чавунних валків СІХН-43 та СІХНФ-47. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 4. С. 22–35. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.241219.22.597>

REFERENCES

1. Hlushkova D.B., Bagrov V.A., Demchenko S.V., Volchuk V.M., Kalinin O.V. and Kalinina N.E. Structure and properties of powder gas-plasma coatings based on nickel. *VANT*. 2022, no. 4 (140), pp. 125–130.
2. Uzlov O. and Bolchakov V. Investigation of Acicular Ferrite Structure in HSLA Steel. Proceedings of the “Materials Week 2002”. Frankfurt : Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2002, pp. 14–20.
3. Dubrov Yu.I., Volchuk V.N. and Bol'shakov V.I. *Primeneniye ekspertnoy informatsii pri formirovani aktivnogo eksperimenta v materialovedenii* [Application of expert information in the formation of an active experiment in materials science]. *Modelirovanie i optimizatsiya v materialovedenii : mater. k 40-j mezhdunar. sem. po modelirovaniyu i optimizatsii kompozitov* [The modeling and optimization in materials science : proc. of 40th Int. Conf.]. Odessa, 2001, pp. 25–26. (in Russian).
4. Dubrov Yu., Bolshakov V. and Volchuk V. *Puti identifikatsii periodicheskikh mnogokriterial'nykh tekhnologiy* [Road periodic identification of multi-criteria Technology]. Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2015, 236 p.
5. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O primenenii fraktal'nogo formalizma pri matematicheskom opisani struktury* [The fractal application formalism in mathematical description of the structure]. *Metallознаvstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2016, no. 2, pp. 26–33. (in Russian).
6. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *K voprosu o postanovke zadachi identifikatsii fraktal'noy struktury metalla* [Statement on the issue of the problem identification of fractal metal structures]. *Visnyk Prydniprovs'koy derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2016, no. 5, pp. 35–39. (in Russian).
7. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Puti primeneniya teorii fraktalov* [Ways of applying the theory of fractals]. Saarbrücken : Palmarium Academic Publishing, 2016, 146 p. (in Russian).
8. Volchuk V. and Dubrov Y. Ways of compensation of incomplete formal axiomatics in identification of complex objects. *Metallознаvstvo ta termichna obrobka metaliv* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2018, no. 4, pp. 31–35.
9. Gödel K. Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I. *Monatshefte für Mathematik und Physik*. 1931, vol. 38, no. 1, pp. 173–198. (in German).
10. Bol'shakov Vad.I., Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Chastkova kompensatsiya nepovnoty formal'noyi aksiomatyky pry identyfikatsiyi struktury metalu* [The partial compensation of incompleteness of formal axiomatics in the identification of the metal structure]. *Visnyk akademiyi nauk Ukrainy* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2014, no. 12, pp. 45–48. (in Ukrainian).
11. Bol'shakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Materialovedcheskiye aspekty primeneniya chastichnoy kompensatsii nepolnoty formal'noy aksiomatiki* [Material aspects of use of partial compensation of incompleteness of formal axiomatics]. *Visnyk Prydniprovs'koy derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2015, no. 5, pp. 10–16. (in Russian).
12. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. Nev-Yuork, San Francisco Freeman, 1982, 480 p.
13. Zhuravel' I.M. and Svirs'ka L.M. Measurement of the mean grain size in a metal by using fractal dimensions. *Materials Science*. 2015, vol. 46, no. 3, pp. 418–420.

14. Zhuravel' I.M. Computer Analysis of the Distribution of Grain Sizes in the Structure of 12Kh1MF Steel After Operation. *Materials Science*. 2019, vol. 55, no. 2, pp. 187–192.
15. Bolshakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Fractals and properties of materials*. Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2016, 140 p.
16. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. Regularization of One Conditionally ill-Posed Problem of Extractive Metallurgy. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2018, vol. 40, no 9, pp. 1165–1171.
17. Bolshakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Topologicheskiye i fraktal'nyye invarianty struktury dlya otsenki kachestva metalla* [Topological and fractal invariants of a structure to assess the quality of a metal]. *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy* [Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2017, no. 4, pp. 42–48. (in Russian).
18. Volchuk V.M. *Rozroblennia i doslidzhennia metodu vyznachennia yakisnykh kharakterystyk metalu na osnovi analizu fraktalnoi rozmirnosti yoho mikrostruktury : diss. na soisk. uchen. step. kand. tehn. nauk : 05.02.01* [Development and research of the method for determining the qualitative characteristics of a metal on the basis of an analysis of the fractal dimension of its microstructure : Candidate Dissertation for Technical Sciences (05.02.01 – Materials Science)]. Dnipropetrovsk, 2003, 186 p. (in Ukrainian).
19. Bol'shakov V.I., Volchuk V.M. and Dubrov Yu.I. *Primeneniye fraktal'nogo modelirovaniya pri otsenke struktury i svoystv metallov* [Application of fractal modelling at the estimation of the structure and properties of metals]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2018, no. 1, pp. 50–55. (in Russian).
20. Volchuk V., Klymenko I., Kroviakov S. and Orešković M. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism. *Tehnički glasnik – Technical Journal*. 2018, vol. 12, no. 2, pp. 93–97.
21. Volchuk V.N. *K voprosu o primenenii teorii mul'tifraktalov dlya otsenki mekhanicheskikh svoystv metalla* [On the application of the theory of multifractals for the evaluation of the mechanical properties of a metal]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 3, pp. 12–19. (in Russian).
22. Volchuk V.M. *Model' otsinyuvannya tverdosti chavunnykh valkiv CIIXH-43 ta CIIXHΦ-47* [Model of assessment of the hardness of the iron rollers CIIXH-43 and CIIXHΦ-47]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2014, no. 3, pp. 12–19. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 15.08.2025.

УДК 725.8.01:721.02

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.123.1199

ВПРОВАДЖЕННЯ ІННОВАЦІЙНИХ СВІТОВИХ ТЕНДЕНЦІЙ 3D-СКАНУВАННЯ ПРИ ПОБУДОВІ ОБ'ЄМНОЇ МОДЕЛІ ЛІЦЕЮ № 15 В МІСТІ ДНІПРО

СОПІЛЬНЯК А. М.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,

ПИЛИПЕНКО О. В.², канд. техн. наук, доц.,

НЕМЦЕВА Т. О.³, канд. пед. наук,

ОЛЕЙНИКОВ В. М.⁴, студ.,

БІЛЯЄВА М. С.⁵, студ.

^{1*} Кафедра нарисної геометрії та графіки, 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) 756-33-80, e-mail: sopilniak.artem@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-3067-0529

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 (056) 756-34-57, e-mail: pylypenko.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0007-2987-7905

³ Директор ліцею № 15, вул. Братів Горобців, 53, 49008, Дніпро, Україна, тел. +38 (093) 424-23-43, e-mail: zso15@dhp.dniprorada.gov.ua, ORCID ID: 0009-0007-9686-8910

⁴ 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) 756-33-80, e-mail: valeraoleynikov2005@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-4218-9426

⁵ 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) 756-33-80, e-mail: beliajevamaria07@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-8314-9540

Анотація. Постановка проблеми. УДУНТ ННІ «ПДАБА» це один з лідерів підготовки фахівців будівельної галузі в Україні, який окрім освітньої діяльності займається інноваційними, просвітницькими та науковими дослідженнями. В рамках науково-технічного проекту «Хімічний та структурний дизайн новітніх функціональних матеріалів» було придбано обладнання для проведення сканування будівель, архітектурних пам'яток, історичних споруд, скульптур, арт об'єктів, інтер'єрів будинків тощо. Методика 3D сканування дозволяє отримати об'ємний макет будівлі в електронному вигляді за досить короткий період, а потім відцифрований варіант використовувати в разі відновлення, реконструкції чи проведення реставраційних робіт по об'єкту. **Мета статті та задачі дослідження** – полягає в скануванні існуючої будівлі ліцею № 15 ДМР в місті Дніпро лазерним 3D сканером Leica BLK360 і в створенні першої в області 3D моделі навчального закладу. Подальше опрацювання отриманих даних дозволить вирішити три основні задачі: 1) для команди фахівців і студентів УДУНТ ННІ «ПДАБА» визначити скільки потрібно часу для проведення сканування, збірки, обробки та опрацювання отриманих даних, для подальших аналогічних робіт; 2) для учнів та вчителів ліцею – ознайомлення з передовими, інноваційними світовими тенденціями 3D сканування та будівельними технологіями; 3) для адміністрації ліцею – отримання готової 3D моделі навчального закладу, яку можна використовувати в навчанні учнів старших класів, а для адміністративно-господарської частини отримання готових креслень для проведення ремонтів, відновлювальних робіт або реконструкції будівлі ліцею № 15. **Висновок.** Команда фахівців і студентів УДУНТ ННІ ПДАБА отримала необхідний практичний досвід при роботі з переносним лазерним 3D сканером Leica BLK360, визначила особливості проведення сканування в умовах діючого навчального закладу освіти, отримала відповіді на ряд особливостей при роботі з програмним забезпеченням, визначила алгоритм дій, орієнтовний час проведення збору та обробки даних.

Ключові слова: 3D модель; сканування; ліцей; будівля; точка вимірювання; лазерний сканер; автоматизоване проектування; масив даних; фасад; будівельні конструкції

IMPLEMENTATION OF INNOVATIVE WORLD TRENDS 3D-SCANNING IN THE CONSTRUCTION OF A 3D MODEL OF LYCEUM NO. 15 IN THE CITY OF DNIPRO

SOPILNIAK A.M.^{1*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

PYLYPENKO O.V.², Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

NIEMTSEVA T.O.³, Cand. Sc. (Pedagogical.),

OLEINYKOV V.M.⁴, Stud.,

BELYAEVA M.S.⁵, *Stud.*

^{1*} Department of Descriptive Geometry and Graphics, 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) 756-33-80, e-mail: sopilniak.artem@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-3067-0529

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: pylypenko.oleksandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0007-2987-7905

³ Director of the Lyceum no. 15, 53, Brothers’ Gorobtsiv St., Dnipro, 49008, Ukraine, tel. +38 (093) 424-23-5743, e-mail: zso15@dhp.dniprorada.gov.ua, ORCID ID: 0009-0007-9686-8910

⁴ 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) 756-33-80, e-mail: valeraolevnykov2005@gmail.com, ORCID ID: 0009-0008-4218-9426

⁵ 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) 756-33-80, e-mail: beliajevamaria07@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-8314-9540

Abstract. Problem statement. USUST ESI “PSACEA” is one of the leading institutions in Ukraine for training specialists in the construction industry. In addition to its educational activities, the institution is actively engaged in innovation, educational initiatives, and scientific research. Within the framework of the scientific and technical project “Chemical and Structural Design of New Functional Materials”, specialized equipment was acquired for the 3D scanning of buildings, architectural monuments, historical structures, sculptures, art objects, building interiors, and more. The 3D scanning method enables the rapid acquisition of a three-dimensional digital model of a building, which can subsequently be used for restoration, reconstruction, or preservation purposes. **The aim of this article** and the objectives of the study are to scan the existing building of Lyceum no. 15 using a Leica BLK360 laser 3D scanner and to develop the first 3D model of an educational institution of this kind in the region. Further processing of the collected data will help address three main objectives: 1) For the team of specialists and students of USUST ESI “PSACEA” – to determine the amount of time required for scanning, assembling, processing, and analyzing the data, in order to plan future similar projects more efficiently. 2) For the students and teachers of the lyceum – to become familiar with cutting-edge, innovative global trends in 3D scanning and construction technologies. 3) For the lyceum administration – to receive a ready-to-use 3D model of the educational institution, which can be used in teaching senior students, and for the administrative and maintenance department to obtain detailed drawings to support repairs, restoration, or reconstruction of the Lyceum No. 15 building. **Conclusion.** The team of specialists and students from USUST ESI “PSACEA” gained valuable practical experience working with the Leica BLK360 portable laser 3D scanner. They identified the specific challenges associated with scanning an operational educational facility, addressed various software-related issues, and established a workflow and estimated timeline for data acquisition and processing.

Keywords: 3D model; scanning; lyceum; building; measurement point; laser scanner; computer-aided design; data array; facade; building structures

Постановка проблеми. УДУНТ ННІ «ПДАБА» це один з лідерів підготовки фахівців будівельної галузі в Україні, який окрім освітньої діяльності займається інноваційними, просвітницькими та науковими дослідженнями. За останні п’ять років ПДАБА приймала активну участь у ряді міжнародних проектів [1–2], один з яких присвячений розширенню горизонтів в 3D моделюванні і графічному проектуванні [3]. В рамках науково-технічного проекту «Хімічний та структурний дизайн новітніх функціональних матеріалів» було придбано обладнання для проведення сканування будівель, архітектурних пам’яток, історичних споруд, скульптур, арт об’єктів, інтер’єрів будинків тощо. Методика 3D сканування дозволяє отримати об’ємний макет будівлі в електронному вигляді за досить короткий період, а потім

відцифрований варіант використовувати в разі відновлення, реконструкції чи проведення реставраційних робіт по об’єкту.

Дніпро має низку об’єктів, які є архітектурними родзинками міста, деякі відносять до історичних об’єктів Катеринославу, деякі існують в одиничному екземплярі інші розроблялись відомими архітекторами чи зодчими регіону.

Аналіз публікацій. У 2017 році Україна приєдналась до Європейської ініціативи щодо впровадження інформаційного моделювання будівель (BIM), яка була організована Європейською Комісією на основі пропозицій Західноєвропейської асоціації цифрового будівництва (Building SMART Europe), погоджених з Європейською групою регуляторів у сфері будівництва та архітектури (European Construction Sector Observatory, ECSO) [4; 5].

Аналіз останніх досліджень у сфері використання 3D моделювання демонструє активне впровадження цифрових технологій у процеси проектування, будівництва та управління життєвим циклом об'єктів. Зокрема, інструменти BIM, лазерне сканування, фотограмметрія та цифрові подвійники дозволяють підвищити точність, скоротити витрати й забезпечити стійкий розвиток у галузі будівництва.

Серед прикладів успішного впровадження 3D моделювання в Україні можна відзначити діяльність провідних технічних університетів, зокрема Українського державного університету науки і технологій (УДУНТ), де активно впроваджуються BIM-технології в навчальний процес та дослідницькі проекти. У рамках європейського грантового проєкту Erasmus+ «The BRIDGE», викладачі та студенти університету проходять стажування в Польщі, Італії та інших країнах ЄС, опановуючи сучасні цифрові інструменти проектування.

У 2025 році студенти УДУНТ ННІ ПДАБА провели 3D-сканування архітектурної спадщини в центрі Дніпра за допомогою сканера Leica BLK360, створюючи цифрові моделі фасадів та

будівельних об'єктів у Revit. Цей досвід поєднує практичну підготовку молодих фахівців з міжнародними стандартами проектування, сприяючи підвищенню якості підготовки кадрів для сталого будівництва [6–8; 11].

Мета статті та задачі дослідження – полягає в скануванні існуючої будівлі ліцею № 15 ДМР в місті Дніпро лазерним 3D сканером Leica BLK360 і в створенні першої в області 3D моделі навчального закладу. Подальше опрацювання отриманих даних дозволить вирішити три основні задачі: 1) для команди фахівців і студентів УДУНТ ННІ ПДАБА визначити скільки потрібно часу для проведення сканування, збірки, обробки та опрацювання отриманих даних, для подальших аналогічних робіт; 2) для учнів та вчителів ліцею – ознайомлення з передовими, інноваційними світовими тенденціями 3D сканування та будівельними технологіями; 3) для адміністрації ліцею – отримання готової 3D моделі навчального закладу, яку можна використовувати в навчанні учнів старших класів, а для адміністративно-господарської частини отримання готових креслень для проведення ремонтів, відновлювальних робіт або реконструкції будівлі ліцею № 15.



а) Leica BLK360



б) Leica BLK360 G2

Рис. 1. Лазерний 3D сканер Leica BLK360 та Leica BLK360 G2

Результати досліджень. Стандартна методика створення робочого проєкту існуючої будівлі передбачає декілька послідовних етапів: ознайомлення з існуючими паперовими кресленнями, визначення технічних та геометричних характеристик будівлі, передбачає обстеження будівлі (при потребі, якщо будівля є аварійною), визначення змін в проєкті (якщо було проведено додаткові

будівельні роботи з розширення, надбудови або перепланування), проведення обмірів рулеткою (переносною або лазерною), створення креслень в AutoCAD (або його аналогів), уточнення графічної частини, створення комплекту графічних матеріалів (ескізного або робочого проєкту) і тільки після всіх вищезазначених дій створення 3D моделі. З лазерний 3D сканером Leica BLK360 (рис. 1, а) або його поліпшеною

модифікацією Leica BLK360 G2 (рис. 1, б), час який потрібен для побудови трьохвимірної об'ємної моделі можна скоротити до 2–3 днів.

Мініатюрний лазерний сканер Leica BLK360/Leica BLK360 G2 – це портативний, ультракомпактний, високошвидкісний швейцарський лазерний 3D сканер розроблений компанією Leica Geosystems, а компанія Autodesk розробила систему автоматизованого проектування під сканер для обробки отриманих даних. Leica BLK360 призначений переважно для інтер'єрної зйомки та виконує панорамне сканування 360° на відстані від 20 до 100 метрів з точністю ± 4 мм., при цьому швидкість сканування становить від 360 тис. до 2 млн. крапок за секунду, з довжиною хвилі – 1550 нм, а отримання повного панорамного скана займає лише 2–3 хвилини. Вбудована цифрова HDR камера з високою роздільною здатністю дозволяє швидко отримати панорамне зображення, а інтегровані інфрачервоні термальні сенсори дозволяють отримувати термографічні знімки [9; 10].

Для проведення заходів щодо першого

сканування та тривимірного моделювання закладу освіти в місті Дніпро, за ініціативи директора ННІ ПДАБА проф. Владислава Данішевського та підтримки ректора УДУНТ проф. Костянтина Сухого, було утворено команду з фахівців УДУНТ ННІ ПДАБА доц. Артема Сопільнака, доц. Олександра Пилипенка та студентів будівельного факультету Валерія Олейникова і Марії Біляєвої із залученням учнів ліцею. Робота почалась з візуального огляду об'єкту, ознайомлення з кресленнями – планів (рис. 2), перерізів, фасадів його геометрією, поверховістю, перепадом висот, можливості встановлення обладнання, визначення точок обзору, кількості стоянок для сканування, визначення часу експозиції, налаштування і синхронізації сканеру та планшету з програмним забезпеченням. Після проведення підготовчих робіт було прийнято рішення щодо початкової точки вимірювання між лівим кутом будівлі та його центральним входом (рис. 3), для формування подальшого ланцюга стоянок по периметру і переходом в середину будівлі.

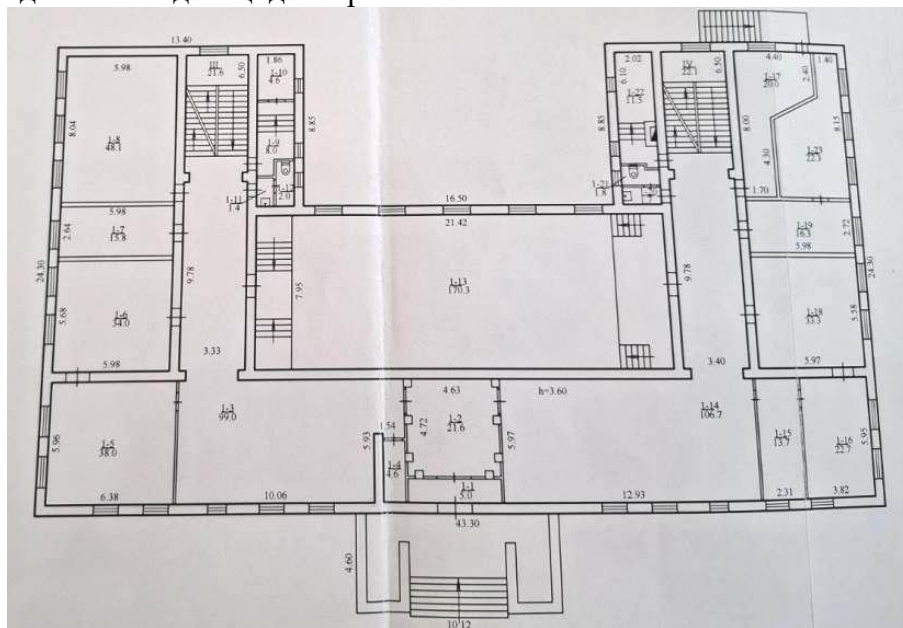


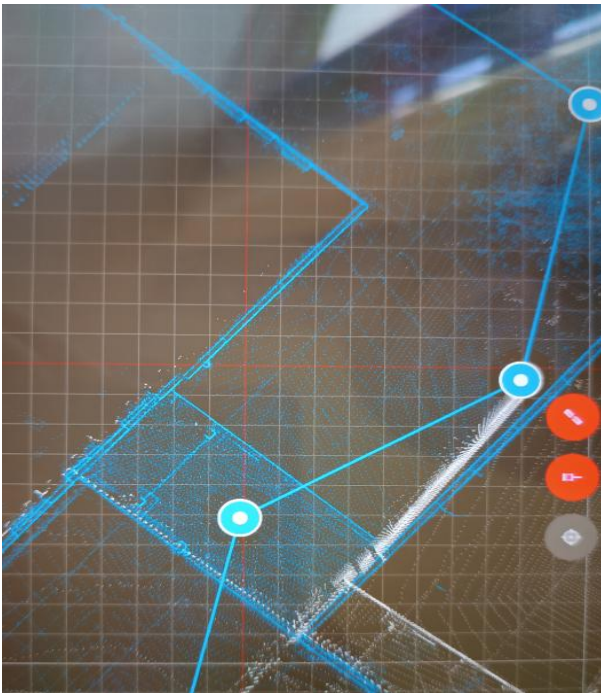
Рис. 2. План 1-го поверху ліцею № 15



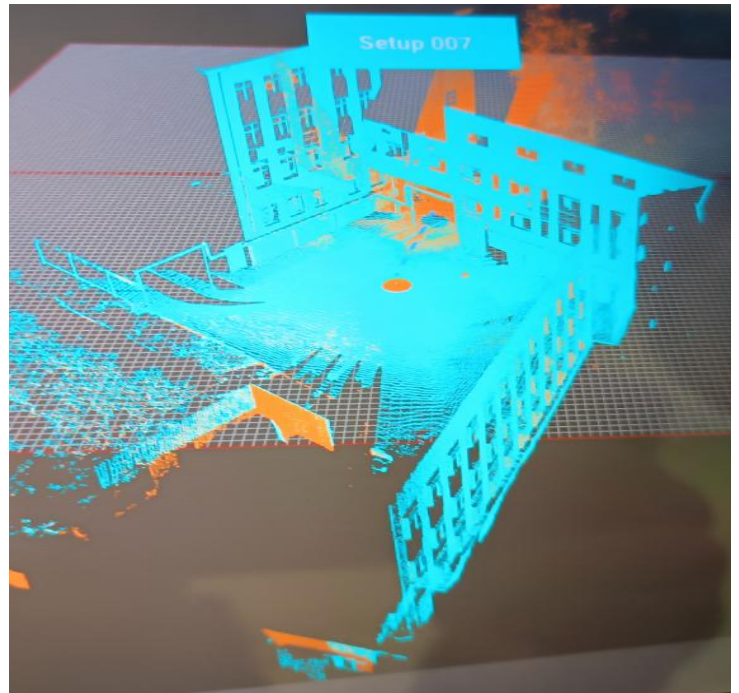
Рис. 3. Встановлення 3D сканеру на першу стоянку з лицьового фасаду будівлі ліцею № 15

В процесі сканування необхідно чітко дотримуватись послідовності дій, виставляти сканер на відстані 15–30 метрів від фасадів, крок точок змінний до 40 метрів, тримати площину, перевіряти зв'язок, щоб він не переривався, не поспішати і перевіряти прив'язку кожної точки стоянки після

проведення сканування. Так після семи стоянок і переході на восьму стоянку (рис. 4, а), програма не змогла їх з'єднати в один масив даних, в результаті чого з'явилась необхідність вручну змінювати площину орієнтації моделі і повертати її на 180 градусів (рис. 4, б).



а) План-схема 4-5 точок стоянок навколо будівлі



б) Проміжна 3D model будівлі

Рис. 4. Проміжна схема та 3D модель будівлі після 7 стоянок збору даних



Рис. 5. План-схема будівлі з кількістю стоянок збору даних

На одну точку наша команда в середньому витрачала 7–10 хвилин, для встановлення триноги з сканером, проведення сканування, завантаженням даних в хмарний простір, синхронізації точки стоянки в просторі та її закріпленні на місцевості, що в цілому зайняло близька 2–2,5 годин. При виконанні сканування виникали певні труднощі технічного характеру, так як іноді зникав Wi-Fi і ми були вимушені дублювати вимірювання в певних точках, а також труднощі з орієнтирами і «прив'язуванні» наступної точки, так як мали місце дерева з пишною кроною, що ускладнювали сканування фасадів. Після кропіткої роботи та очікувань обробки загального масиву даних наша команда отримала загальну план-схему, де було ув'язано 18 стоянок в один загальний масив точок (рис. 5), який давав можливість

для створення першої 3D моделі навчального закладу будівлі ліцею № 15 в місті Дніпро.

Другою задачею, було ознайомлення учнів ліцею № 15 з передовими, інноваційними світовими тенденціями 3D сканування та будівельними технологіями, для їх зацікавлення і підготовки до обрання вищого навчального закладу, зробити усвідомлений вибір для визначення своє майбутньої професії.

Для вирішення другої задачі доц. Артем Сопільняк провів вступну лекцію-інструктаж, як працювати з обладнанням, як змінювати налаштування, яким чином закріплювати масив точок в програмному комплексі, змінювати прив'язку, розривати зв'язок між послідовними точками, коригувати отримані дані та створювати загальну модель (рис. 6, 7).



Рис. 6. Ознайомлення учнів ліцею з технологією 3D сканування будівель

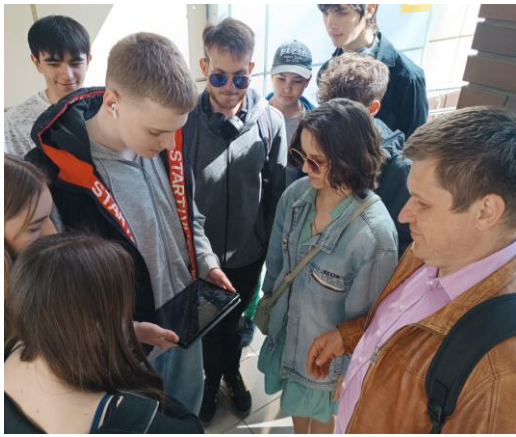


Рис. 7. Робота учнів ліцею № 15 з технологією 3D сканування будівель



Рис. 8. Загальне фото команди УДУНТ ННІ ПДАБА та учнів ліцею № 15

Після проведення сканування зовнішніх фасадів та окремих будівельних конструкцій ззовні, а також після сканування внутрішніх поверхонь приміщень, сходових клітин, класів, кабінетів, коридорів тощо команда фахівців, студентів УДУНТ ННІ ПДАБА та учнів 8–11 класів ліцею № 15 зробили загальне фото на центральному вході до будівлі (рис. 8).

Після обробки даних було отримано завершену 3D модель ліцею № 15 (рис. 9).

Отримавши об'ємну 3D модель будівлі ліцею № 15 ми вирішили третю задачу, яка було поставлена перед нами, а саме отримати готову 3D моделі навчального закладу, яку можна використовувати в навчанні учнів старших класів, а для адміністративно-господарської частини отримання готових креслень для проведення ремонтів, відновлювальних робіт або реконструкції будівлі ліцею.

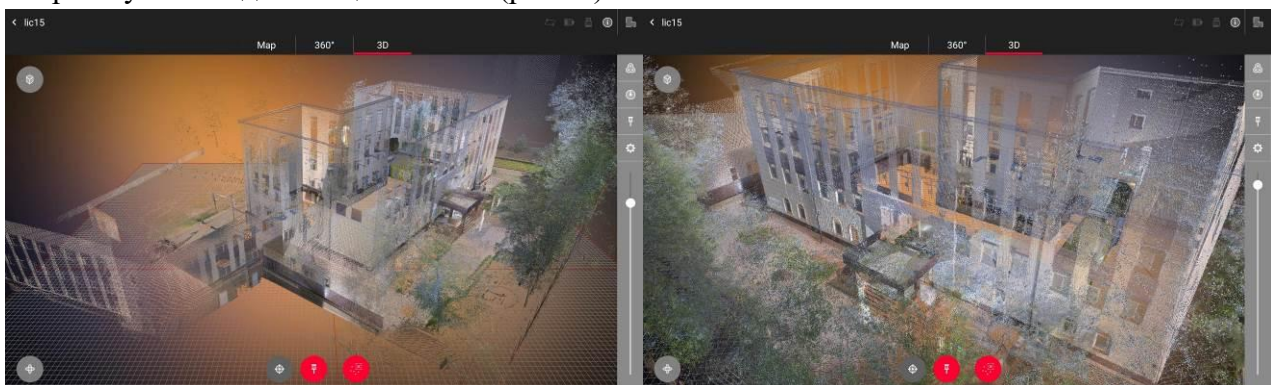


Рис. 9. Об'ємна 3D модель ліцею № 15

Команда фахівців і студентів УДУНТ ННІ ПДАБА отримала необхідний

практичний досвід при роботі з переносним лазерним 3D сканером Leica BLK360,

визначила особливості проведення сканування в умовах діючого навчального закладу освіти, отримала відповіді на ряд особливостей при роботі з програмним забезпеченням, визначила алгоритм дій, орієнтовний час проведення збору та обробки даних. Це досвід ми плануємо впровадити і на інших об'єктах дошкільної та шкільної освіти в місті Дніпро. Заплановано провести аналогічні роботи в ряді інших ліцеїв та гімназій м. Дніпра для побудови 3D моделей.

Висновки

В результаті проведеної роботи було досягнуто (вирішено) наступні задачі:

➤ Було відскановано чотирьох поверхову будівлю ліцею № 15 ДМР в місті Дніпро, як з зовні по фасадах будівлі, так і з середини, стіни підлоги, холи, коридори, сходові марші, використовуючи новітній мобільний переносний лазерний 3D сканером Leica BLK360 швейцарської фірми Leica.

➤ Було відскановано будівлю ліцею, оброблено отриманий масив точок,

відкоригована об'ємно-планувальна складова проєкцій та отримано першу в Дніпропетровській області 3D модель навчального закладу.

➤ Команда фахівців і студентів УДУНТ ННІ ПДАБА визначила фактичний обсяг проведених камеральних робіт, ознайомчих та робіт із сканування подібного об'єкту, обробки та опрацювання отриманих даних і нарешті видачі готового результату у вигляді об'ємної 3D моделі навчального закладу.

➤ Було проведено ознайомлення учнів 8-11 класів ліцею № 15 з передовими, інноваційними світовими тенденціями 3D сканування та будівельними технологіями, що дозволило провести профорієнтаційну роботу та підвищити зацікавленість до вищої освіти будівельного профілюю

➤ Керівництво та адміністративно-господарська частини отримали готовий комплект креслень в електронному вигляді, який можна використовувати в подальшому для проведення ремонтів, відновлювальних робіт або реконструкції будівлі ліцею № 15 в майбутньому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Модуль Жана Моне. Європейські практики із зеленої трансформації : уроки для України. Проєкт 101085133 – EUGREEN. URL: <https://pgasa.dp.ua/jean-monnet-project/opys-proyektu/>
2. Інноваційні магістерські курси на підтримку покращення енергетичного та вуглецевого сліду будівельного фонду України. Проєкт 101082898 – UKRENERGY. URL: <https://pgasa.dp.ua/ukrenergy-project/opys-proyektu/>
3. Подолання розриву між університетом і промисловістю : інноваційна магістерська навчальна програма, що підтримує розвиток зелених робочих місць і цифрових навичок в українському будівельному секторі. Проєкт 101127884 – The BRIDGE. URL: <https://pgasa.dp.ua/the-bridge-project/opys-proyektu/>
4. Building SMART International. URL: <https://www.buildingsmart.org/>
5. European Construction Sector Observatory, ECSO. URL: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/construction/observatory_en?prefLang=uk
6. Fandiei A., Sopilniak A., Shabanova K. 3D scanning as a modern architect's tool. *Engineer of the Third Millennium : proceedings of International students' scientific conference*. Dnipro : USUST, ESI «PSACEA», 2024. Pp. 29–31.
7. Фінал конкурсу «CREATE 3D SCAN». URL: <https://pgasa.dp.ua/news/final-konkursu-create-3d-scan/>
8. Сучасні технології УДУНТ ННІ «ПДАБА» крокують разом з абітурієнтами ліцею № 15. URL: <https://pgasa.dp.ua/news/suchasni-tehnologiyi-udunt-nni-pdaba-krokuyut-razom-z-abituriyentamy-litseyu-15/>
9. Навігаційно-геодезичний центр. Лазерний сканер Leica BLK360. URL: <https://leica-geosystems.com.ua/product/blk360/>
10. Навігаційно-геодезичний центр. Лазерний сканер Leica BLK360 G2. URL: <https://surl.li/upvuce>
11. Титюк А., Ярова Т., Середа С., Сіренко К., Правоторова А. Інтеграція технології 3D-сканування при створенні моделі будівлі ліцею. *Технічні науки та технології*. 2025. № 2 (40). С. 493–501. URL: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-493-501](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-493-501)

REFERENCES

1. Modul' Zhana Mone. Yevropeys'ki praktyky iz zelenoyi transformatsiyi : uroky dlya Ukrayiny. Proyeckt 101085133 – EUGREEN [Jean Monnet Module. European practices on Green Deal : lessons for Ukraine Project 101085133 – EUGREEN]. URL: <https://pgasa.dp.ua/jean-monnet-project/opys-proyektu/> (in Ukrainian).
2. Innovatsiyini mahisters'ki kursy na pidtrymku pokrashchennya enerhetychnoho ta vuhletsevoho slidu budivel'noho fondu Ukrayiny. Proyeckt 101082898 – UKRENERGY [Innovative Master Courses Supporting the Improvement of the Energy and Carbon Footprint of the Ukrainian Building Stock Project 101082898 – UKRENERGY]. URL:

<https://pgasa.dp.ua/ukrenergy-project/opys-proyektu/>

3. *Podolannya rozryvu mizh universytetom i promyslovistyu : innovatsiyna mahisters'ka navchal'na prohrama, shcho pidtrymuje rozvytok zelenykh robochykh mist' i tsyfrovyykh navychok v ukrayins'komu budivel'nomu sektori. Proyeckt 101127884 – The BRIDGE* [Bridging the gap between university and industry: an innovative master's degree program supporting the development of green jobs and digital skills in the Ukrainian construction sector. Project 101127884 – The BRIDGE]. URL: <https://pgasa.dp.ua/the-bridge-project/opys-proyektu/> (in Ukrainian).

4. Building SMART International. URL: <https://www.buildingsmart.org/>

5. European Construction Sector Observatory, ECSO. URL: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/construction/observatory_en?prefLang=uk

6. Fandiei A., Sopilniak A. and Shabanova K. 3D scanning as a modern architect's tool. Engineer of the Third Millennium : Proceedings of International Students' Scientific Conference. Dnipro : USUST, ESI “PSACEA”, 2024, pp. 29–31.

7. *Final konkursu “CREATE 3D SCAN”* [Final of the “CREATE 3D SCAN” competition]. URL: <https://pgasa.dp.ua/news/final-konkursu-create-3d-scan/> (in Ukrainian).

8. *Suchasni tekhnolohiyi UDUNT NNI PDABA krokuyut' razom z abituriyentamy litseyu № 15* [Modern technologies of UDUNT ESI “PSACEA” walk together with the applicants of Lyceum no. 15]. URL: <https://pgasa.dp.ua/news/suchasni-tehnologiyi-udunt-nni-pdaba-krokuyut-razom-z-abituriyentamy-litseyu-15/> (in Ukrainian).

9. *Navihatsiyno-heodezychnyy tsentr. Lazernyy skaner Leica BLK360* [Navigation and Geodetic Center. Leica BLK360]. URL: <https://leica-geosystems.com.ua/product/blk360/> (in Ukrainian).

10. *Navihatsiyno-heodezychnyy tsentr. Lazernyy skaner Leica BLK360 G2* [Navigation and Geodetic Center. Leica BLK360 G2]. URL: <https://surl.li/upvuce> (in Ukrainian).

11. Tytiuk A., Yarova T., Sereda S., Sirenok K. and Pravotorova A. *Intehratsiya tekhnolohiyi 3D-skanuvannya pry stvorenni modeli budivli litseyu* [Integration of 3D scanning technology in the development of a lyceum building model]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohiyi* [Technical Sciences and Technologies]. 2025, no. 2 (40), pp. 493–501. URL: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-493-501](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-493-501) (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 21.08.2025.

УДК 691.73:669.35

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.132.1200

АНАЛІЗ НОРМАТИВНИХ ВИМОГ ТА ДІАГРАМ ФАЗОВИХ РІВНОВАГ БРОНЗ СИСТЕМИ Cu–Sn–Si

УЗЛОВ К. І.^{1*}, докт. техн. наук, проф.,
СОЛОНЕНКО Л. І.², докт. техн. наук, доц.,
ВОРОНКО Ю. С.³, асп.,
БІЛИЙ А. П.⁴, асп.,
КІМСТАЧ Т. В.⁵, канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. + 38 (067) 950-14-08, e-mail: konst.uzlov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0744-9890

² Кафедра цивільної безпеки та охорони праці, Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1, 65044, Одеса, Україна, тел. +38 (093) 123-81-40, e-mail: li.solonenko@op.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2092-8044

³ Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. + 38 (050) 346-31-10, e-mail: ingenpismnet@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-6410-6509

⁴ Кафедра ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. + 38 (093) 395-23-72, e-mail: 777bap777@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2905-7046

⁵ 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: 1375tatvana@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8993-201X

Анотація. Бронзи, завдяки своїм властивостям, з кожним роком знаходять дедалі широкое застосування в різних галузях промисловості. У зв'язку з ускладненням умов експлуатації технічних пристроїв та зростанням вимог до довговічності й надійності матеріалів, постає необхідність використання бронз з розширеним числом преференційних властивостей. Вирішення цієї задачі, де результатом стане поєднання бажаних рівнів показників механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей в одному мідь-олов'яному сплаві треба шукати в напрямку розробки нових систем їх легування. Представлені дані свідчать про те, що бронзи системи Cu–Sn–Si можуть поєднувати в собі найкращі властивості, притаманні як олов'яним, так і кремнієвим бронзам. Це робить їх перспективними для застосувань, де важливі високі механічні характеристики, корозійна стійкість, хороша оброблюваність і формуваність. Однак олов'яно-кремнієві бронзи не є достатньо дослідженими і не є нормативно забезпеченими. З цієї причини, олов'яно-кремнієві бронзи не мають широкого промислового розповсюдження і, як наслідок, не користуються гідною дослідницькою увагою. Виходячи з викладеного, робота, яка присвячена встановленню закономірностей фазових перетворень і структуроутворення у бронзах системи Cu–Sn–Si з різним вмістом кремнію й олова є актуальною. **Мета дослідження.** Встановлення закономірностей фазових перетворень і структуроутворення у бронзах системи Cu–Sn–Si з різним вмістом кремнію й олова. **Методика дослідження.** У роботі проводили аналіз ливарних олов'яних бронз за ASTM B505 та EN 1982. Зразки для досліджень (Ø16×100 мм) виготовляли шляхом заливання розплаву бронзи піщану ливарну форму. Для виготовлення бронз використовували вихідні шихтові матеріали технічної чистоти. Плавку проводили в індукційній печі з графітовим тиглем під шаром деревного вугілля. Хімічний склад бронз визначали на приборі EXPERT 4L. Мікроструктурні дослідження проводили на шліфах, виготовлених стандартними методами відповідно до вимог ASTM E3-11(2017) «Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens». Структуру вивчали за допомогою оптичного мікроскопа NEOPHOT 21 зі збільшенням від 100 до 1000. **Висновки.** Металографічними дослідженнями структуроутворення сплавів трикомпонентної системи Cu–Sn–Si встановлені закономірності фазових перетворень сплавів мідного куту її конодного трикутника. Отримали подальший розвиток уявлення про ефект легування олов'яної бронзи кремнієм.

Ключові слова: бронза; діаграми фазових рівноваг; закономірності фазових перетворень; мікроструктура

ANALYSIS OF REGULATORY REQUIREMENTS AND PHASE EQUILIBRIUM DIAGRAMS OF BRONZES OF THE Cu–Sn–Si SYSTEM

UZLOV K.I.^{1*}, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,
SOLOVENKO L.I.², Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

VORONKO Yu.S.³, *Postgrad. Stud.*,
BILYI A.P.⁴, *Postgrad. Stud.*,
KIMSTACH T.V.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

^{1*} Department of Material Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana Str., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. + 38 (067) 950-14-08, e-mail: konst.uzlov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0744-9890

² Department of Civil Safety and Occupational Safety and Health, Odessa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine, tel. +38 (093) 123-81-40, e-mail: li.solonenko@op.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-2092-8044

³ Department of Material Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana Str., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. + 38 (050) 346-31-10, e-mail: ingenpisemnet@gmail.com, ORCID ID: 0009-0003-6410-6509

⁴ Department of Casting Production, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana Str., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. + 38 (093) 395-23-72, e-mail: 777bap777@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2905-7046

⁵ Department of Material Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana Str., 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: 1375atyana@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8993-201X

Abstract. Bronzes, due to their properties, are increasingly widely used in various industries every year. Due to the complexity of the operating conditions of technical devices and the growing requirements for the durability and reliability of materials, there is a need to use bronzes with an expanded number of preferential properties. The solution to this problem, where the result will be a combination of the desired levels of mechanical, technological and operational properties in one copper-tin alloy, should be sought in the direction of developing new systems for their alloying. The presented data indicate that bronzes of the Cu–Sn–Si system can combine the best properties inherent in both tin and silicon bronzes. This makes them promising for applications where high mechanical characteristics, corrosion resistance, good machinability and formability are important. However, tin-silicon bronzes have not been sufficiently studied and are not provided for by regulations. For this reason, tin-silicon bronzes do not have wide industrial distribution and, as a result, do not receive due research attention. Based on the above, the work devoted to establishing the regularities of phase transformations and structure formation in bronzes of the Cu–Sn–Si system with different silicon and tin contents is relevant. **Purpose of the study** Establishing the regularities of phase transformations and structure formation in bronzes of the Cu–Sn–Si system with different silicon and tin contents. **Research methodology.** The work analyzed foundry tin bronzes according to ASTM B505 and EN 1982. Samples for research ($\varnothing 16 \times 100$ mm) were made by pouring molten bronze into a sand casting mold. The initial charge materials of technical purity were used to manufacture the bronzes. Melting was carried out in an induction furnace with a graphite crucible under a layer of charcoal. The chemical composition of the bronzes was determined on the EXPERT 4L instrument. Microstructural studies were carried out on sections prepared by standard methods in accordance with the requirements of ASTM E3-11(2017) “Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens”. The structure was studied using a NEOPHOT 21 optical microscope with a magnification of 100 to 1000. **Conclusions.** Metallographic studies of the structure formation of alloys of the ternary system Cu–Sn–Si established the regularities of phase transformations of alloys of the copper corner of its conoid triangle. We received further development of the idea of the effect of doping tin bronze with silicon.

Keywords: bronze; phase equilibrium diagrams; phase transformation patterns; microstructure

Вступ. Бронзи, завдяки своїм властивостям, таким як висока міцність, електрична та теплопровідність, корозійна стійкість у морській воді, водяній парі, на повітрі та в інших хімічно активних середовищах, а також високим триботехнічним властивостям, з кожним роком знаходять дедалі широкі застосування в таких галузях, як електротехніка, енергетичне машинобудування, суднобудування, автомобіле- та приладобудування, авіаційна промисловість, будівництво тощо.

У зв'язку з ускладненням умов експлуатації технічних пристроїв та зростанням вимог до довговічності й

надійності матеріалів, постає необхідність удосконалення властивостей бронзових сплавів. Це вимагає комплексного підходу, що включає оптимізацію хімічного складу існуючих сплавів, застосування додаткового легування, модифікації та вдосконалення технологій виготовлення деталей. Такі заходи сприяють підвищенню ефективності та надійності технічних пристроїв, в яких використовують бронзові сплави, та відповідають зростаючим вимогам сучасної техніки та промисловості.

Актуальність. На сьогодні найбільш поширеними мідними сплавами є бронзи системи Cu–Sn [1], які широко застосовуються для виготовлення арматури загального

призначення, в тому числі елементів тертя, фасонних частин трубопровідних систем, високонавантажених компонентів шнекових приводів, натискних і шпindelних гайок, вінців черв'ячних коліс, деталей, що експлуатуються в умовах гідродинамічного змащення тощо [2; 3].

Технологічні, механічні та експлуатаційні властивості олов'яних бронз залежать як від вмісту в них олова так і умов лиття [4]. Зокрема, при литті в піщані форми, з підвищенням вмісту олова в бронзі спостерігається зростання її міцності та твердості при одночасному зменшенні подовження. В той же час, при литті під тиском в металеві прес-форми підвищення вмісту олова до 4 мас. % призводить до збільшення подовження бронзи, тоді як при вмісті олова в бронзі понад 4 мас. % спостерігається його зниження. Ударна в'язкість сплавів системи Cu-Sn зростає при вмісті олова до 5 мас. % Sn, однак при вищих значеннях вмісту олова (понад 5 мас. %) спостерігається її зниження. При цьому, міцність на розтяг олов'яних бронз збільшується зі зростанням вмісту олова до 10 мас. %, а твердість бронз має лінійну залежність від вмісту в них олова [5–7].

В цілому, олов'яні бронзи при задовільній міцності мають високі показники корозійної стійкості, антифрикційних властивостей. Олов'яним бронзам притаманні низький коефіцієнт тертя, високий опір зносу, низька чутливість до корозії під напругою. З точки зору ливарних властивостей, олов'яні бронзи характеризуються невисокою рідкоплинністю великий інтервал кристалізації, який, наприклад для бронзи з 4...6 мас. % олова складає 150...200 °C [3]. Саме з великим інтервалом кристалізації Осінцев О. Е. (2004) пов'язує схильність виливків з олов'яних бронз до виникнення розосередженої усадкової пористості по їх об'єму.

В числі основних легувальних елементів стандартизованих олов'яних бронз – фосфор, цинк, свинець та нікель.

Фосфор – ефективний розкислювач, який при відносно невеликому вмісті підвищує міцність, твердість, зносостійкість та

рідкоплинність бронз, але знижує їх пластичність.

Цинк знижує схильність бронз до ліквації, підвищує їх міцність і рідкоплинність, сприяє отриманню лиття з більшою щільністю, що надає литим деталям більшої герметичності.

Свинець підвищує триботехнічні властивості, рідкоплинність і щільність бронз, полегшує обробку різанням.

Нікель подрібнює зерно, підвищує міцність, пластичність та деформованість бронз, підвищує корозійну стійкість, щільність, зменшує ліквацію в литих бронзах [3; 8].

Крім легуючих компонентів всі бронзи технічної чистоти, як і будь які інші сплави, характеризуються наявністю в них певної кількості небажаних домішок. Показники кількості та складу небажаних домішок в кожній марці бронзи індивідуально зазначено у відповідній нормативно-технічній документації і, в ряді випадків, вони можуть бути скореговані за домовленістю між виробником та “Замовником” бронзових виробів.

Зазвичай в олов'яних бронзах в числі небажаних домішок є більше 0,05 мас. % Al, 0,4 мас. % Fe, 0,05% мас. Si, 0,5 мас. % Sb, 0,5 мас. % Pb та 0,1 мас. % P, вплив яких на властивості олов'яних бронз носить різновекторний характер [9]. Відносно небажаних домішок у бронзах Курдюмов А. В. (1982) зазначає, що з усіх домішок, які присутні у бронзах, найбільш негативний вплив на властивості олов'яних бронз мають алюміній та кремній. Такий погляд на присутність в олов'яних бронзах, зокрема, кремнію зумовлений його негативним впливом на рівень властивостей цих бронз – властивостей, які вважалися преференційними на час розробки цих сплавів, що і обумовило жорстке нормативне обмеження кількості кремнію в олов'яних бронзах.

Сучасний бурхливий розвиток техніки потребує використання бронз з розширеним числом преференційних властивостей. Вирішення цієї задачі, де результатом стане поєднання бажаних рівнів показників механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей в одному

мідь-олов'яному сплаві треба шукати в напрямку розробки нових систем їх легування. Зокрема, незважаючи на відсутність окремих стандартів для бронз системи Cu–Sn–Si, існують перспективи для розробки таких сплавів [4; 10; 11].

В роботі [4], показано що мікролегування сплаву CuSn10 0,04 % мас. Si сприяє підвищенню його плинності та герметичності виливків, робить цей сплав більш придатним для застосування у відповідальних конструкціях, де важлива висока щільність та якість поверхні. За даними Комкова В.Г (2013), збільшення вмісту Si до 5,0 мас % різко підвищує твердість олов'яної бронзи, що пояснюється збільшенням в структурі бронзи частки легованого кремнієм олов'яного евтектоїду з високою (3200...3500 МПа) мікротвердістю. При цьому, вплив Si на теплопровідність бронзи є аналогічним впливу Al.

Авторами роботи [11], розроблено бронзу, яка демонструє значне перевищення показників міцності та ударної в'язкості порівняно з традиційною дзвоною бронзою, зокрема у 1,5...2,5 рази, при збереженні або навіть підвищенні відносного видовження та має збільшену тривалість звучання. Розроблена бронза має вміст олова у 3,6...10 разів менший за традиційну дзвонову бронзу та додатково легована 4,5...5,5 мас. % Si.

В роботі [12] досліджено вплив вмісту олова в межах 0,1...1,5 мас. % на структуру, механічні та фізичні властивості кремнієвої бронзи Cu–3%Si. Отримані результати свідчать про те, що з підвищенням вмісту олова в сплаві спостерігається зростання границі міцності на розтяг, твердості та електричного опору. Водночас, відносне подовження та електропровідність зменшуються з підвищенням вмісту олова.

Представлені дані свідчать про те, що бронзи системи Cu–Sn–Si можуть поєднувати в собі найкращі властивості, притаманні як олов'яним, так і кремнієвим бронзам. Це робить їх перспективними для застосувань, де важливі високі механічні характеристики, корозійна стійкість, хороша оброблюваність і формуваність. Однак, як

свідчать представлені дані, олов'яно-кремнієві бронзи не є достатньо дослідженими і не є нормативно забезпеченими. З цієї причини, олов'яно-кремнієві бронзи не мають широкого промислового розповсюдження і, як наслідок, не користуються гідною дослідницькою увагою. Виходячи з викладеного, робота, яка присвячена встановленню закономірностей фазових перетворень і структуроутворення у бронзах системи Cu–Sn–Si з різним вмістом кремнію й олова є актуальною.

Мета дослідження. Встановлення закономірностей фазових перетворень і структуроутворення у бронзах системи Cu–Sn–Si з різним вмістом кремнію й олова.

Методика дослідження. У роботі проводили аналіз ливарних олов'яних бронз за ASTM B505 та EN 1982.

Зразки для досліджень ($\varnothing 16 \times 100$ мм) виготовляли шляхом заливання розплаву бронзи піщану ливарну форму. Для виготовлення бронз використовували вихідні шихтові матеріали технічної чистоти. Плавку проводили в індукційній печі з графітовим тиглем під шаром деревного вугілля. Хімічний склад бронз визначали на приборі EXPERT 4L.

Мікроструктурні дослідження проводили на шліфах, виготовлених стандартними методами відповідно до вимог ASTM E3-11(2017) «Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens». Хімічне травлення здійснювали у розчині $3,5 \text{ г FeCl}_3 + 25 \text{ мл HCl} + 75 \text{ мл C}_2\text{H}_5\text{OH}$ за режимами наданими в роботі Беккерт М. (1988). Структуру вивчали за допомогою оптичного мікроскопа NEOPHOT 21 зі збільшенням від 100 до 1000.

Результати досліджень. Через нормативно-індустріальне обмеження авторам наявної роботи у відкритих довідкових джерелах трикомпонентну діаграму стану системи мідь-олово-кремній знайти не вдалось. Тому, у цих дослідженнях оцінка закономірностей структуроутворення сплавів трикомпонентної системи Cu–Sn–Si здійснювалась на підставі результатів власного мікроструктурного аналізу за вимогами ASTM E3-11(2017).

У ході ідентифікації мікроструктур сплавів системи Cu–Sn–Si автори виходили із теоретичних положень, які закономірно

впливають із аналізу подвійних діаграм Cu–Si (рис. 1, а) та Cu–Sn (рис. 1, б) [13; 14].

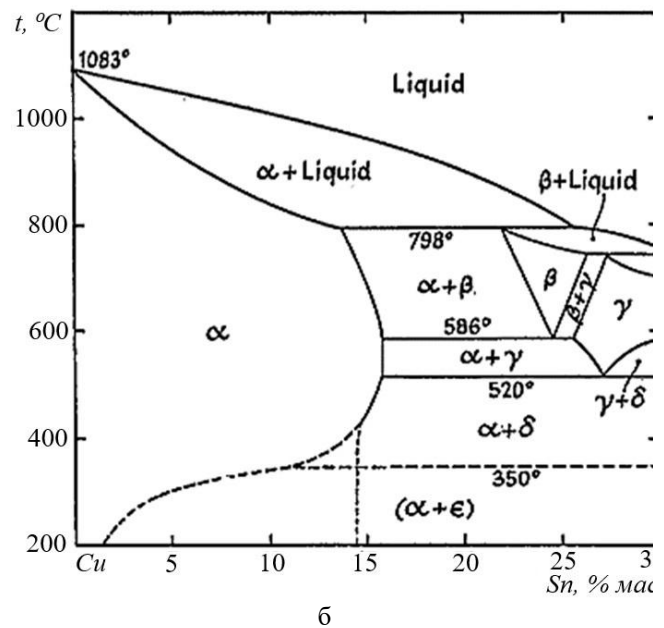
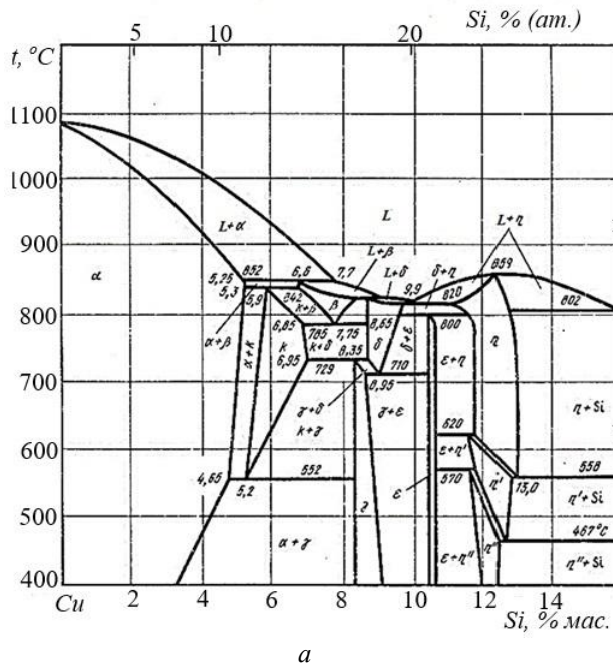


Рис. 1. Мідний кут діаграми фазових рівноваг систем Cu–Si (а) та Cu–Sn (б) [13; 14]

У мідному куту обох діаграм ($T_{\text{пл. Cu}} = 1084^\circ\text{C}$), після кристалізації первинних дендритів α -Cu, першим здійснюється перитектичне перетворення $L + \alpha\text{-Cu} \rightarrow \beta$. Температури перитектичної рівноваги у системі Cu–Sn – 798°C , а в системі Cu–Si (за даними різних авторів) – $852\ldots 785^\circ\text{C}$, тобто, практично однакові. Із цього випливає висновок про те, що поверхня ліквідус в мідному куту потрійної системи Cu–Si–Sn є суцільно спільною між осями Cu–Si та Cu–Sn. Під нею розміщується двофазна просторова область $L + \alpha$. Склад рідкої фази закономірно залежить від концентрації компонентів у сплавах. Далі при охолодженні відбувається перитектична реакція $L + \alpha\text{-Cu} \rightarrow \beta$. Склад β -фази, очевидно, залежить від складів вихідних фаз, в першу чергу – рідкої. Важливим, в даному випадку є той факт, що в обох випадках β -фази є кристалографічно подібними – ОЦК ($\text{Im}\bar{3}\text{m}$) з майже однаковими параметрами решітки – $0,2981\text{nm}$ у системі Cu–Sn та $0,2854\text{nm}$ в системі Cu–Si (дані роботи Лякишева Н. П. (2001)).

Із викладеного випливає, що у потрійній системі Cu–Si–Sn продуктом перитектичної

реакції є β -фаза змінного, відповідно до сукупності компонентів у сплаві, хімічного складу. Цей факт знаходиться у повній відповідності до даних роботи Лебедева К. П. (1973).

Подальша кінетика евтектоїдних перетворень закономірно обумовлена ступенем легованості вихідної β -фази, на що вказано в роботі Комкова В. Г. (2013). Тобто, у кінцевій структурі бронзи закономірно очікувати формування евтектоїдної складової з різним ступенем легованості хімічної сполуки, що входить до її складу, або наявності різних проміжних фаз, або стабілізації при кімнатній температурі легованої високотемпературної фази β без перетворення, або, навіть, збереження одночасно продуктів двох перитектичних реакцій систем Cu–Sn та Cu–Si. Такі фази, щоб запобігти плутанини з раніш використаними позначеннями мартенситних фаз (дані роботи Ісайчева І (1939)), в наявній роботі умовно прийняті – $\beta_{(\text{Cu-Sn})}$ для системи Cu–Sn та $\beta_{(\text{Cu-Si})}$ для системи Cu–Si.

Через суттєву різницю температур плавлення міді ($T_{\text{пл. Cu}} = 1084^\circ\text{C}$) та олова ($T_{\text{пл. Sn}} = 231,9^\circ\text{C}$), дослідники трикомпонентно

ї системи Cu–Sn–Al [15; 16] наводять відомості про існування в олов'яній області діаграми протяжної ділянки купола незмішуваності двох рідких фаз L' та L'' з відповідною монотектичною рівновагою під ним. Виходячи із цього положення, в роботі [15] для сплаву з фіксованою концентрацією міді 10 мас. % наведені температури фазових рівноваг відповідного політермічного перерізу діаграми: лінія розшарування – 587 °C, монотектична горизонталь – 558 °C, евтектична рівновага за участю твердих фаз – 523,8 °C. Автори [16] наводять інформацію про високотемпературні перетворення сплавів системи Cu–Sn–Al на перших етапах тверднення. Першою при охолодженні відбувається реакція $L' \rightarrow L'' + \beta$ за температури 785 °C. За нею – $\beta + \gamma\text{CuSn} \rightarrow L' + \text{CuSn}$ за 642 °C. Зрозуміло, що неможливо однозначно транслювати ці закономірності на іншу діаграму системи Cu–Sn–Si, але факт первинної кристалізації твердої фази з рідини та подальшу кінетику кристалізації відповідно до трифазної реакції перетворення рідкої фази іншого складу до уваги прийняти корисно.

Металографічні дослідження сплавів системи Cu–Sn–Si із сумарним вмістом Sn+Si до 5 мас. % демонструють наявність однофазної структури трикомпонентних бронз (рис. 2, а) [11].

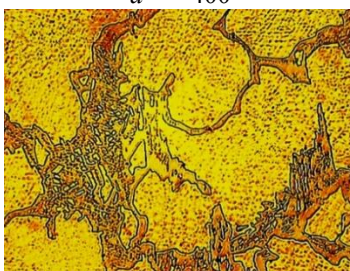
Перевищення вказаної концентрації призводить до втрачання сплавами системи Cu–Sn–Si однофазної структури і формування у сплавах крім первинних дендритів твердого розчину на основі міді ($\alpha\text{-Cu}^I$) ще і рівномірно розташованих частинок β -фази (рис. 2, б) та/або продуктів її твердофазного розпаду за евтектоїдним механізмом перетворення (рис. 2, в). В цьому випадку, принциповий вплив на кінцеву структуру має кількість кремнію у трикомпонентній композиції сплаву.

За результатами дослідження [11] встановлена тенденція до підвищення кількості продуктів евтектоїдного розпаду вихідної β -фази в бронзі при зростанні вмісту в сплавах олова. Водночас, у всіх випадках (рис. 2, в) зафіксована значна кількість залишкової вихідної β -фази. Тобто, твердофазні перетворення для сплавів системи Cu–Sn–Si відбуваються складно і не до повного завершення розпаду високотемпературної фази.

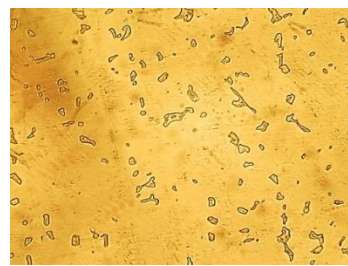
Інша кінетика структуроутворення спостерігається в сплавах системи Cu–Sn–Si з вмістом кремнію більше 4 мас. %. В даному випадку (див. рис 2, з) вихідна β -фаза стабілізується кремнієм і в твердому стані не підпорядковується низькотемпературним евтектоїдним перетворенням.



а – ×400



в – ×1 000



б – ×1 000



з – ×500

Рис. 2. Мікроструктура сплавів трикомпонентної системи Cu–Sn–Si зі співвідношенням компонентів Sn та Si: 0,649 мас. % Sn + 0,618 мас. % Si (а); 5,4 мас. % Sn + 1,9 мас. % Si (б); 4,044 мас. % Sn + 1,889 мас. % Si (в); 2,080 мас. % Sn + 4,950 мас. % Si (з)

Висновки

За результатами металографічних досліджень структур сплавів трикомпонентної системи Cu–Sn–Si встановлено:

– в сплавах системи Cu–Sn–Si із сумарним вмістом Sn+Si до 5 мас. % створюється однофазна α -Cu структура трикомпонентних бронз;

– перевищення сумарної концентрації Sn+Si в олов'яно-кремнієвій бронзі понад 5 мас. % призводить до формування у сплавах крім первинних дендритів твердого розчину на основі міді (α -Cu^I) ще і β -фази та/або продуктів її твердофазного розпаду;

– для сплавів з вмістом Si до 4 мас. % зафіксована тенденція до підвищення кількості продуктів евтектоїдного розпаду вихідної β -фази в бронзі при зростанні вмісту в сплавах олова;

– в сплавах системи Cu–Sn–Si з вмістом Si більше 4 мас. % вихідна β -фаза стабілізується кремнієм і в твердому стані не підпорядковується низькотемпературним евтектоїдним перетворенням при менші ніж 4 мас. % кількості олова в бронзі.

За даними результатів роботи отримали подальший розвиток уявлення про ефект легування олов'яної бронзи кремнієм. Зокрема, встановлено, що, при оптимальному співвідношенні компонентів в досліджених бронзах, кремній, як легуючий компонент високотемпературної β -фази, стабілізує її у метастабільній температурній області зі сталим подальшим стабільним існуванням, навіть після нормативного низькотемпературного відпалу виливків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Liang Z., Jiang K., Zhang T. Electrochemical and passive behaviour of Cu–Sn bronze in simulated archaeological soil media. *Materials and Corrosion*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1002/maco.202011894>
2. Tin Bronze AMPCO METAL. AMPCO METAL. URL: <https://www.ampcometal.com/products/standard-alloys/tin-bronze/> (date of access : 04.05.2025).
3. Грешта В. Л., Лисиця О. В., Степанова Л. П. Кольорові метали та сплави на їх основі : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНТУ, 2014. 286 с.
4. Witasiaik D. et al. Effect of Alloying Additives and Moulding Technology on Microstructure, Tightness, and Mechanical Properties of CuSn10 Bronze. *Materials*. 2023. Vol. 16, № 24. P. 7593. URL: <https://doi.org/10.3390/ma16247593>
5. Nadolski M. The Evaluation of Mechanical Properties of High-tin Bronzes. *Archives of Foundry Engineering*. 2017. Vol. 17, № 1. Pp. 127–130. URL: <https://doi.org/10.1515/afe-2017-0023>
6. Bartocha D., Baron C., Suchoń J. The Influence of Solidification Rate on HightinBronze Microstructure. *Archives of Foundry Engineering*. 2023. URL: <https://doi.org/10.24425/afe.2018.125197>
7. Audy J. Effects of microstructure and chemical composition on strength and impact toughness of tin bronzes. *MM Science Journal*. 2009. Vol. 2009, № 02. Pp. 125–129. URL: https://doi.org/10.17973/mmsj.2009_06_20090303
8. Official Site of Copper Development Association, Inc. (USA). URL: <https://www.copper.org/applications/marine/cuni/alloys/pub-206-copper-alloys-for-marine-environments.pdf> (дата звернення : 04.05.2025).
9. Кімстач Т. В., Узлов К. І., Солоненко Л. І., Реп'ях С. І., Хричиков В. Є., Білий О. П., Білий А. П., Іванова Л. Х. Дослідження впливу домішок в бронзі БрО3А3 на її механічні властивості. *Теорія і практика металургії*. 2021. № 4 (129). С. 41–47. URL: <https://doi.org/10.34185/tpm.4.2021.05>
10. Воронко Ю. С., Якименко Д. Ю., Узлов К. І., Кімстач Т. В. Аналіз перспективності розробки та використання конструкційних бронз системи Cu–Sn–Si. *МОЛОДІ ВЧЕНІ 2025 – ВІД ТЕОРІЇ ДО ПРАКТИКИ : XV Всеукр. конф. мол. вч.* (20 березня 2025 р., м. Дніпро, Україна). 2025. С. 21–24.
11. Uzlov K. I., Mazorchuk V. F., Dziubina A. V. Structural formation regularity of Cu–Sn–Si system low-tin «singing» bronze. *Achievements of ukraine and eu countries in technological innovations and invention*. 2022. Pp. 466–487. URL: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8-16>
12. Nnakwo K. C., Nnuka E. E. Correlation of the Structure, Mechanical and Physical Properties of Cu–3wt%Si–xwt%Sn Silicon Bronze. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. №. 13. Pp. 83 – 91. URL: https://www.researchgate.net/publication/332858609_Correlation_of_the_Structure_Mechanical_and_Physical_Properties_of_Cu-3wtSi-xwtSn_Silicon_Bronze.
13. ASM Metals Handbook. Vol. 03 : Alloy Phase Diagrams (2016). ASM International. URL: http://www.asminternational.org/search/-/journal_content/56/10192/25871543/PUBLICATION
14. ASM Specialty Handbook : Copper and Copper Alloys. 2001. URL: https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=sxkPJzmkhnUC&oi=fnd&pg=PA3&dq=copper+alloys+properties&ots=ALru4fmwiT&sig=LpJwaHeZglwGgWtJ4m38xyCK45E&redir_esc=y#v=onepage&q=copper%20alloys%20properties&f=false

15. Kotadia H. R., Patel J. B., Fan Z. et al. Processing of Al–45Sn–10Cu Based Immiscible Alloy by a Rheomixing Process. *Solid State Phenomena*. 2008. Vol. 141–143. Pp. 529. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.141-143.529.
16. Mircovic D., Grober J., Schmid-Fetzer R.. Liquid Demixing and Microstructure Formation in Ternary Al–Sn–Cu Alloys. *Materials Science & Engineering*. 2008. A 487. Pp. 456. DOI: 10.1016/j.msea.2007.10.043.

REFERENCES

1. Liang Z., Jiang K. and Zhang T. Electrochemical and passive behaviour of Cu–Sn bronze in simulated archaeological soil media. *Materials and Corrosion*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1002/maco.202011894>
2. Tin Bronze AMPCO METAL. AMPCO METAL. URL: <https://www.ampcometal.com/products/standard-alloys/tin-bronze/> (date of access : 04.05.2025).
3. Greshta V.L., Lysitsya O.V. and Stepanova L.P. *Kol'orovi metaly ta splavy na yikh osnovi : navchal'nyy posibnyk* [Non-ferrous metals and alloys based on them : a textbook]. Zaporizhzhia : ZNTU Publ., 2014, 286 p. (in Ukrainian).
4. Witasiaak D. et al. Effect of Alloying Additives and Moulding Technology on Microstructure, Tightness, and Mechanical Properties of CuSn10 Bronze. *Materials*. 2023, vol. 16, no. 24, p. 7593. URL: <https://doi.org/10.3390/ma16247593>
5. Nadolski M. The Evaluation of Mechanical Properties of High-tin Bronzes. *Archives of Foundry Engineering*. 2017, vol. 17, no. 1, pp. 127–130. URL: <https://doi.org/10.1515/afe-2017-0023>
6. Bartocha D., Baron C. and Suchoń J. The Influence of Solidification Rate on HightinBronze Microstructure. *Archives of Foundry Engineering*. 2023. URL: <https://doi.org/10.24425/afe.2018.125197>
7. Audy J. Effects of microstructure and chemical composition on strength and impact toughness of tin bronzes. *MM Science Journal*. 2009, vol. 2009, no. 02, pp. 125–129. URL: https://doi.org/10.17973/mmsj.2009_06_20090303
8. Official Site of Copper Development Association, Inc. (USA). URL: <https://www.copper.org/applications/marine/cuni/alloys/pub-206-copper-alloys-for-marine-environments.pdf>
9. Kimstach T.V., Uzlov K.I., Solonenko L.I., Repiakh S.I., Khrychikov V.Ye., Bilyi O.P., Bilyi A.P. and Ivanova L.Kh. *Doslidzhennia vplyvu domishok v bronzi BrO3A3 na yii mekhanichni vlastyosti* [Investigation of impurities in bronze BrO3A3 influence on its mechanical properties]. *Teoriia i praktyka metalurhii* [Theory and Practice]. 2021, no. 4 (129), pp. 41–47. URL: <https://doi.org/10.34185/tpm.4.2021.05> (in Ukrainian).
10. Voronko Yu.S., Yakymenko D.Iu., Uzlov K.I. and Kimstach T.V. *Analiz perspektyvnosti rozrobky ta vykorystannia konstruktsiinykh bronz systemy Su–Sn–S* [Analysis of the prospects for the development and use of structural bronzes of the Cu–Sn–Si system]. *MOLODI VChENI 2025 – VID TEORII DO PRAKTYKY : XV Vseukrainska konferentsiia molodykh vchenykh* [YOUNG SCIENTISTS 2025 – FROM THEORY TO PRACTICE : XV All-Ukrainian Conference of Young Scientists]. March 20, 2025, Dnipro, Ukraine, pp. 21–24. (in Ukrainian).
11. Uzlov K.I., Mazorchuk V.F. and Dziubina A.V. Structural formation regularity of Cu–Sn–Si system low-tin “singing” bronze. *Achievements of Ukraine and EU Countries in Technological Innovations and Invention*. 2022, pp. 466–487. URL: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8-16>
12. Nnakwo K.C. and Nnuka E.E. Correlation of the Structure, Mechanical and Physical Properties of Cu–3wt%Si–xwt%Sn Silicon Bronze. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018, no. 13, pp. 83–91. URL: https://www.researchgate.net/publication/332858609_Correlation_of_the_Structure_Mechanical_and_Physical_Properties_of_Cu-3wtSi-xwtSn_Silicon_Bronze.
13. ASM Metals Handbook. Vol. 03: Alloy Phase Diagrams. 2016. ASM International. URL: http://www.asminternational.org/search/-/journal_content/56/10192/25871543/PUBLICATION
14. ASM Specialty Handbook : Copper and Copper Alloys. 2001. URL: https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=sxkPJzmkhUC&oi=fnd&pg=PA3&dq=copper+alloys+properties&ots=ALru4fmwiT&sig=LpJwaHeZglwGgWtJ4m38xyCK45E&redir_esc=y#v=onepage&q=copper%20alloys%20properties&f=false
15. Kotadia H.R., Patel J.B., Fan Z. et al. Processing of Al–45Sn–10Cu Based Immiscible Alloy by a Rheomixing Process. *Solid State Phenomena*. 2008, vol. 141–143, pp. 529. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.141-143.529.
16. Mircovic D., Grober J. and Schmid-Fetzer R. Liquid Demixing and Microstructure Formation in Ternary Al–Sn–Cu Alloys. *Materials Science & Engineering*. 2008, A 487, pp. 456–467. DOI: 10.1016/j.msea.2007.10.043.

Надійшла до редакції 12.08.2025.

УДК 628.11

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.140.1201

ВИБІР СХЕМИ ДОДАТКОВОГО ЖИВЛЕННЯ ВОДОПРОВІДНИХ МЕРЕЖ

ШАРКОВ В. В.¹, канд. техн. наук, доц.,
НЕСТЕРОВА О. В.^{2*}, канд. техн. наук, доц.,
НАГОРНА О. К.³, канд. техн. наук, доц.,
НЕЧИТАЙЛО М. П.⁴, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, 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) 756-34-74, e-mail: shar_kov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-8942-3701

^{2*} Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, 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) 756-34-74, e-mail: melenanesterenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1035-6572

³ Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, 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) 756-34-74, e-mail: nahorna.olena@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-4027-9336

⁴ Кафедра водопостачання, водовідведення та гідравліки, 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) 756-34-74, e-mail: n_np@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-5963-0590

Анотація. Постановка проблеми. Надійна робота систем водопостачання характеризується подачею споживачам розрахункової кількості води з підтримкою необхідного тиску в мережах в місцях розбору води. Одною з проблем систем водопостачання, яка виникає після певного періоду експлуатації, є зростання водоспоживання з потребою додаткового живлення мереж. **Мета дослідження.** Додаткові витрати можуть вводитися до мереж одним об'єднаним потоком з повною витратою в основний вузол живлення мережі, окремим потоком в будь-який вузол мережі, чи розподіленими частинами в будь-які вузли. Вибір схеми додаткового живлення потребує визначення необхідності використання нових вузлів живлення, їх розташування та розподілення витрат води з вузлом основного живлення. Критерієм оптимальності вибраної схеми можуть слугувати мінімальні напори, які будуть створюватися насосним обладнанням чи втрати напору на ділянках мереж. **Методика.** Пошук оптимальної схеми додаткового живлення мереж водопостачання оснований на перегляді всіх можливих вузлів введення води до мереж та розподілу величини додаткової витрати води між вузлами живлення. Розгляд кожного варіанту передбачає визначення витрат води та втрат напору на ділянках мереж при відповідних поточкорозподіленнях. **Результати.** Проведений аналіз проблем експлуатації мереж водопостачання з визначенням етапів та інтенсивності наростання потреби їх розширення; розглянуті фактори, які впливають на вибір вузлів додаткового живлення кільцевих мереж водопостачання з забезпеченням оптимальних розподілів потоків та витрат води на ділянках; досліджені гідравлічні характеристики ділянок мереж при змінах витрат води та поточкорозподілення; проаналізовані варіанти поточкорозподілення в мережах з різною кількістю ділянок; розглянутий алгоритм визначення оптимальних вузлів кільцевих мереж для під'єднання додаткових джерел живлення. **Наукова новизна.** Проведений аналіз факторів, що впливають на вибір схем додаткового живлення мереж, показана необхідність врахування розподілу витрат води між вузлами додаткового живлення, що дозволить експлуатувати мережі з найменшими витратами енергії. **Практична значимість.** Використання результатів аналізу дозволяють найбільш оперативно та ефективно вирішувати питання вибору варіанту додаткового живлення водопровідних мереж.

Ключові слова: водопостачання; додаткове живлення мереж

SELECTION OF ADDITIONAL POWER SUPPLY SCHEME FOR WATER NETWORKS

SHARKOV V.V.¹, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
NESTEROVA O.V.^{2*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
NAHORNA O.K.³, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
NECHYTAILO M.P.⁴, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

¹ Department of Water Supply, Wastewater Engineering and Hydraulics, 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) 756-34-74, e-mail: shar_kov@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-8942-3701

^{2*} Department of Water Supply, Wastewater Engineering and Hydraulics, 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) 756-34-74, e-mail: melenanesterenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-1035-6572

³ Department of Water Supply, Wastewater Engineering and Hydraulics, 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) 756-34-74, e-mail: nahorna.olena@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0003-4027-9336

⁴ Department of Water Supply, Wastewater Engineering and Hydraulics, 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) 756-34-74, e-mail: n_np@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-5963-0590

Abstract. Problem statement. The reliable operation of water supply systems is characterized by the delivery of the design amount of water to consumers while maintaining the required pressure at water draw-off points. One of the common issues in water supply networks that arises after a certain period of operation is the increase in water consumption, which leads to the need for additional supply to the network. **Purpose of the study.** Additional flow volumes may be introduced into the network either as a single combined stream with the full volume routed to the main supply node, as a separate flow to any node, or as distributed portions across multiple nodes. The choice of a supplementary supply scheme requires determining whether new supply nodes should be used, their optimal placement, and how to distribute flow between them and the main supply node. Optimization criteria may include minimizing the pressure generated by pumping equipment or minimizing head losses along network sections. **Methodology.** The search for an optimal scheme of additional network supply is based on the assessment of all possible locations for water input and the distribution of additional water flow between these supply nodes. Each option involves the determination of water flow rates and head losses across network sections under corresponding flow distribution scenarios. **Results.** The study includes an analysis of operational challenges in water supply networks, identification of stages and intensity of increasing demand for system expansion, and examination of factors influencing the selection of supplementary supply nodes in ring-type water supply networks. It ensures optimal flow and consumption distribution across network sections. The hydraulic characteristics of network segments under varying flow rates and distributions were studied, and different distribution variants in networks with various numbers of segments were analyzed. Additionally, an algorithm for determining optimal nodes for connecting supplementary water sources in ring networks was considered. **Scientific novelty.** The study analyzes key factors affecting the selection of supplementary supply schemes, demonstrating the importance of accounting for the distribution of water flow among supply nodes to enable energy-efficient operation of the system. **Practical value.** The results of the analysis allow for faster and more effective decision-making in the selection of supplementary supply schemes for water distribution networks.

Keywords: water supply; additional power supply networks

Постановка проблеми. Надійна робота систем водопостачання характеризується подачею споживачам розрахункової кількості води з підтримкою необхідного тиску в мережах в місцях розбору води.

Одною з проблем систем водопостачання, яка виникає після певного періоду експлуатації, є зростання водоспоживання з потребою додаткового живлення мереж. Таке зростання, без певних компенсаційних заходів, призводить до збільшення проблем експлуатації систем – знижуються напори та спостерігається недодача води в віддалених районах мереж [1].

На початкових етапах виникнення таких проблем, тимчасовим рішенням є збільшення потужності насосного обладнання та збільшення діаметрів деяких ділянок мереж.

В гірших випадках проблема може перекластися на споживачів – подача води за графіками.

Якщо дефіцит води не подоланий, проблему вирішують більш складними та коштовними методами – будують нові споруди чи розширюють існуючі, замінюють обладнання та графіки їх роботи, ведуть пошук нових джерел водопостачання з вирішенням питань потрібної якості води.

При проектуванні нових систем водопостачання чи їх окремих об’єктів проблема можливого розширення розглядається та враховується. Нові системи водопостачання розраховуються на певне заплановане зростання водоспоживання. При цьому, призначаються економічно обґрунтовані попередні терміни роботи

проектних водопроводів до їх розширення або корінних реконструкцій.

Після пуску в експлуатацію запроектованих систем водопостачання потужності встановлених насосів, ємності резервуарів, пропускна здатність водопроводів і мереж перевищують ті, які потрібні для подачі запланованих кількостей води на кінець прийнятого розрахункового терміну. В цей період системи працюють з деяким недовантаженням і витрачають меншу кількість енергії на підйом води.

У міру зростання водоспоживання зменшується розрив між витратами води, які фактично витрачаються і запланованими.

До моменту, коли ці величини стануть рівними, повинні бути готові до пуску в експлуатацію споруди наступної черги розвитку водопроводу.

В деяких випадках, кількість води, яка буде додатково вводитися до мереж критично не велика, і є можливість забезпечити додаткове живлення невеликим водозабором (свердловиною чи груповим водозабором з кількох колодязів). В такому випадку потреби в підготовці води може і не бути, якщо якість води водоносного горизонту задовільної якості, а мережа водопостачання може обійтися без конструктивних змін (діаметри ділянок мережі не змінюються, додаткові ділянки не прокладаються).

Додаткове джерело живлення може розташовуватися на майданчику існуючого водозабору і розглядатися, як його нова частина (розширення водозабору), а може бути окремою спорудою з розташуванням в будь-якому місці і приєднуватися до мережі водопостачання в вузлах, відмінних від основного вузлу живлення [2].

Так, як якість води нових водозабірних потужностей не потребує обробки для використання, то (при всіх інших подібностях чи різницях) для їх введення до мереж потрібне суміщення напірних характеристик додаткових витрат в вузлі їх приєднання та характеристик існуючого насосного обладнання.

Мета дослідження. Додаткові витрати можуть вводитися до мереж одним

об'єднаним потоком з повною витратою в основний вузол живлення мережі, окремим потоком в будь-який вузол мережі, чи розподіленими частинами в основний вузол та новий [3].

Вибір схеми додаткового живлення потребує визначення необхідності використання нових вузлів живлення, їх розташування та розподілення витрат води з вузлом основного живлення. Критерієм оптимальності вибраної схеми можуть слугувати мінімальні напори насосного обладнання чи втрати напору на ділянках мереж.

Пошук оптимальної схеми додаткового живлення мереж водопостачання оснований на перегляді всіх можливих вузлів введення води до мереж та розподілу величини додаткової витрати води між вузлами живлення. Розгляд кожного варіанту передбачає визначення витрат води та втрат напору на ділянках мереж при відповідних потокорозподіленнях.

Методика. Ділянки мереж, які виходять з вузлів основного живлення – трубопроводи з найбільшою пропускною спроможністю, мають найбільші діаметри та, на відміну від інших ділянок, можуть пропускати додаткові витрати води без критичного збільшення втрат напору [4]. Тому, першими, на можливість введення додаткових витрат води, повинні аналізуватися вузли основного живлення мереж.

Після цього розглядається питання збільшення живлення мережі введенням додаткових витрат води в інші вузли.

Розподіл додаткових витрат води між вузлами введення впливає на кількість можливих варіантів потокорозподілення, кількість яких диктується кількістю ділянок мереж та деякими обмеженнями їх участі в нових варіантах.

Ділянки, які виходять з вузлів основного живлення, незалежно від розподілу витрат, повинні мати тільки незмінні напрямки руху води, які відповідають початковому потокорозподіленню.

Крім того, додаткове живлення мереж не повинно децентралізувати систему водопостачання, коли введення води до

деяких вузлів призведе до відокремлення районів мереж. При цьому можуть з'явитися нові точки сходження потоків. Такі варіанти поточкорозподілення розглядатися не повинні.

Аналіз однокільцевих мереж (магістральні трубопроводи систем розподілення води), з врахуванням вказаних умов появи можливих варіантів поточкорозподілень, дозволив визначити їх кількість (табл. 1).

Таблиця 1

Кількість варіантів поточкорозподілення

Кількість ділянок кільцевої мережі	Кількість варіантів поточкорозподілення
3	2
4	3
5	4
6	5
7	6
n	n-1

Кількості варіантів поточкорозподілень відповідає кількість необхідних однотипних гідравлічних розрахунків мереж, які і визначають реальні витрати води та втрати напору по ділянках мереж. Однотипні розрахунки мають однаковий склад ділянок мережі, які складають розрахункові півкільця, за рівністю втрат напору в яких, судять про завершення розрахунку. Участь вузлів мереж, які розглядаються, як додаткові джерела живлення, тип гідравлічного розрахунку не змінюють – змінюються лише витрати води на ділянках.

Введення до мереж додаткових витрат води обмежується пропускною спроможністю існуючих трубопроводів. Необгрунтоване збільшення витрат буде супроводжуватися критичним збільшенням втрат напору. Тому, величини додаткових витрат води повинні обмежуватися технічними можливостями мережі.

Для визначення оптимальної схеми додаткового живлення була розглянута однокільцева водопровідна мережа з п'ятьма ділянками. Для зручності аналізу довжини ділянок та вузлові витрати прийняті

однаковими. Діаметри ділянок мереж підбиралися з економічним фактором 0,75.

Аналіз мережі проводився при введенні додаткових витрат води з кроком 4 л/с, що збільшувало витрату на 10 % від розрахункового значення 40 л/с.

На рисунку представлена розрахункова схема мережі з одним з варіантів поточкорозподілення та розподілом витрат між вузлами введення т. 1 – 92 л/с та т. 5 – 24 л/с.

Збільшуючи живлення мережі тільки через вузол т. 1, витрати води досягли 94 л/с. Більші величини викликали високі напори насосів, які, з урахуванням мінімальних значень потрібних вузлових напорів, перевищували граничні напірні умови дослідження (45 м. в. ст.).

Подальше збільшення додаткового живлення мережі стало можливим при одночасному використанні інших вузлів в якості точок введення води.

Для оцінки енергоємності варіантів поточкорозподілень та розподілу витрат між двома вузлами введення води до мережі, виявилось зручним використання категорії «умовна енергія», (л/с)/м, – характеристики одночасної роботи насосного обладнання у вузлах введення води.

В таблиці 2 наведені результати визначення величин умовної енергії, яка витрачається на підйом води насосами, при економічному розподілі витрат води між вузлами введення води в мережу

Аналіз даних таблиці 2 свідчить, що використання вузлу т. 1, в якості єдиного вузлу введення збільшених витрат води в мережу, є доцільним лише в діапазоні витрат 72–88 л/с. При інших витратах вигідно використовувати два вузли введення з розподілом води між ними в різних пропорціях. Так, при витраті мережею 68 л/с найбільш ефективна схема – використання вузлів т. 1 та т. 5 одночасно для введенні води з розподілом витрат між ними 40/28, відповідно. При цьому умовна енергія, яку будуть витрачати насоси в двох вузлах складе 936,6 (л/с)•м.

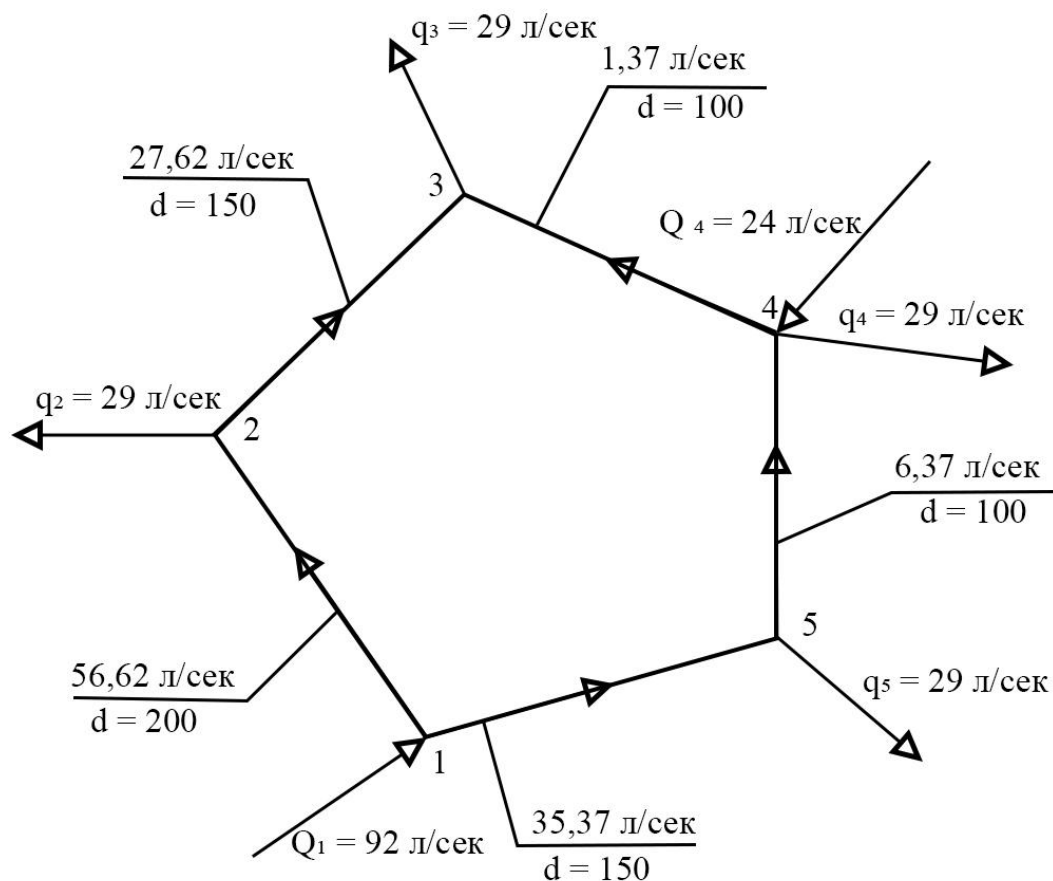


Рис. Потокорозподілення та витрати води по ділянках мережі

Таблиця 2

Кількість варіантів потокорозподілення

Сумарна витрата води мережею, л/с	Надходження води тільки до т. 1	Додаткове надходження води до т. 2	Додаткове надходження води до т. 3	Додаткове надходження води до т. 4	Додаткове надходження води до т. 5
	Витрата, л/с Умовна енергія, (л/с)/м	Витрата, л/с Умовна енергія, (л/с)/м	Витрата, л/с Умовна енергія, (л/сек)/м	Витрата, л/с Умовна енергія, (л/с)/м	Витрата, л/с Умовна енергія, (л/с)/м
44				4 / 217,2	
48				8 / 184	
52				12 / 180,8	
56				16 / 175,28	
60			20 / 521,2		
64			24 / 623,5		
68					28 / 936,6
72	72 / 1560,2				
76	76 / 1834,6				
80	80 / 2140,1				
84	84 / 2478,2				
88	88 / 2858,6				
92			36 / 1845,6		
96			32 / 2137,9		
100			40 / 2366,2		
104				12 / 2494,1	
108				16 / 2317,4	
112				20 / 2189,6	
116				24 / 2211,8	
120				28 / 2632,2	
124				32 / 3008,6	

Більшість результатів, з розподілом додаткових витрат води між вузлами мережі, з найменшими витратами умовної енергії спостерігається при використанні вузлів т. 1 та т. 4. Але, в діапазоні сумарних витрат води 60–100 л/с, найкращі результати дають інші варіанти використання вузлів мережі, як точок її живлення. В цьому діапазоні кількість найкращих варіантів розділилася порівну між схемами використання вузлів т. 1 та т. 3 одночасно та вузлу т. 1, як одного джерела живлення мережі. Лише один варіант використання схеми вузлів т. 1 та т. 5 виявився найкращим при розподілі витрат 40 та 28 л/с між ними. Варіант з використанням вузлів т. 1 та т. 2 жодного разу не показав найкращих результатів.

Висновки

1. Результати досліджень свідчать, що рішення проблеми введення додаткових витрат води до мереж водопостачання потребує аналізу всіх варіантів поточкорозподілення.

2. Показано, що існують варіанти схем додаткового живлення мереж водопостачання без внесення конструктивних змін в системи подачі та розподілення води.

3. При визначеній величині витрати води мережами з'являється можливість вибирати схему розподілу витрат між вузлами введення, що дозволить, в подальшому, експлуатувати мережі з найменшими витратами енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Петімко П. І., Прокопчук І. Т., Царик М. Ф. Налагодження роботи систем водопостачання. Київ : Врожай, 1995. 256 с.
2. Тугай А. М., Тугай Я. А. Водопостачання. Джерела та водозабірні споруди : посіб. Українсько-фінський інститут менеджменту і бізнесу, 1998. 196 с.
3. Шарков В. В., Нестерова О. В., Журавльова О. А., Жефруа Д. В. Пошук точок приєднання додаткових джерел живлення систем водопостачання. *Український журнал будівництва та архітектури*. № 3. 2021. С. 116–122.
4. Тугай А. М., Терновцев В. О., Тугай Я. А. Розрахунок і проектування споруд систем водопостачання : навч. посіб. Київ : КНУБА, 2001. 256 с.

REFERENCES

1. Petimko P.I., Prokopchuk I.T. and Tsaryk M.F. *Nalahodzhennia roboty system vodopostachannia* [Setting up water supply systems]. Kyiv : Vrozhai Publ., 1995, 256 p. (in Ukrainian).
2. Tuhai A.M. and Tuhai Ya.A. *Vodopostachannia. Dzherela ta vodozabirni sporudy : posibnyk* [Water supply. Sources and water intake structures : manual]. *Ukrainsko-finskyi instytut menedzhmentu i biznesu* [Ukrainian-Finnish Institute of Management and Business]. 1998, 196 p. (in Ukrainian).
3. Sharkov V.V., Nesterova O.V., Zhuravlova O.A. and Zhefrua D.V. *Poshuk tochok pryiednannia dodatkovykh dzherel zhyvlennia system vodopostachannia* [Search for connection points for additional power sources for water supply systems]. *Ukrayins'kyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2021, no. 3, pp. 116–122. (in Ukrainian).
4. Tuhai A.M., Ternovtsev V.O. and Tuhai Ya.A. *Rozrakhunok i proektuvannia sporud system vodopostachannia : navch. posib.* [Calculation and design of water supply system structures : textbook]. Kyiv : KNUBA, 2001, 256 p. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 30.08.2025.

UDC 691:628.4.042.004.8

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.146.1202

USE OF BUILDING MATERIALS FROM WASTE FOR THE MANUFACTURE OF A SARCOPHAGUS AND CARRYING OUT REPAIR AND CONSTRUCTION WORKS IN THE EXCLUSION ZONE

LEVYTSKA O.H.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
RUSAKOVA T.I.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
DOLZHENKOVA O.V.³, *Cand. Sc. (Tech.), Sen. Res.*,
ZOLOTKO O.V.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
VOYTENKO J.V.⁵, *Cand. Sc. (Tech.)*.

^{1*} Department of Ecology and Environmental Protection, Dnipro State Technical University, 2, Dniprobudivska St., Kamianske, 51918, Ukraine, e-mail: LLevi@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2598-3651

² Department of Life Safety, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharin Ave., Dnipro, 49010, Ukraine, e-mail: rusakovati1977@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5526-3578

³ Department of Life Safety, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharin Ave., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (050) 908-59-89, e-mail: dolena2017@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7970-8110

⁴ Department of Life Safety, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharin Ave., Dnipro, 49010, Ukraine, e-mail: zltklena@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2482-7574

⁵ Department of Life Safety, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharin Ave., Dnipro, 49010, Ukraine, e-mail: Juliya.voytenko.1983@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0819-3794

Abstract. Problem statement. Industrial waste can often become the main raw material for the manufacture of building materials for special purposes. The use of such waste is the key to preserving ecosystems and reducing funding for repair and construction work at the Chernobyl NPP. **The purpose of the work:** determination of quality characteristics, in particular frost resistance and water absorption, of samples of building materials from sewage sludge at urban treatment plants and recycled polypropylene, determination of the main stages of raw material preparation and manufacturing of building products. **Methodology.** The work used methods of mathematical data processing to determine the optimal composition of sewage sludge and polypropylene in raw material mixtures for the manufacture of special-purpose building blocks. **Scientific novelty.** The work proposes non-traditional raw material components for the manufacture of building blocks, their ratio is evaluated to ensure the highest frost resistance and optimal water absorption indicators. It was established that the experimental samples of the blocks, according to the results of the tests, are not inferior in these parameters to other analogues produced from traditional raw materials. **Practical value.** The use of waste significantly reduces the cost of repair and construction work and allows you to reduce and then carry out remediation work in the territories of their traditional location – silt maps. **Results.** For the implementation of the specified technologies, raw material costs have been calculated, heat costs, temperatures, heating time of raw material mixtures, and cooling time of construction products have been determined. The optimal ratios of sewage sludge to polypropylene are 65–70 % (mass fraction): 35–30 % (mass fraction), which provides the highest frost resistance and optimal water absorption.

Keywords: civil protection; life safety; waste; recyclable materials; building materials; frost resistance; water absorption; polypropylene

ВИКОРИСТАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ВІДХОДІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ САРКОФАГУ ТА ПРОВЕДЕННЯ РЕМОНТНО-БУДІВЕЛЬНИХ РОБІТ В ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ

ЛЕВИЦЬКА О. Г.^{1*}, *канд. техн. наук, доц.*,
РУСАКОВА Т. І.², *докт. техн. наук, проф.*,
ДОЛЖЕНКОВА О. В.³, *канд. техн. наук, с. н. с.*,
ЗОЛОТЬКО О. В.⁴, *канд. техн. наук, доц.*,
ВОЙТЕНКО Ю. В.⁵, *канд. техн. наук*

¹ Кафедра екології та охорони навколишнього середовища, Дніпровський державний технічний університет, вул. Дніпробудівська, 2, 51918, Кам'янське, Україна, e-mail: LLevi@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2598-3651

² Кафедра безпеки життєдіяльності, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49000, Дніпро, Україна, e-mail: rusakovati1977@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5526-3578

³ Кафедра безпеки життєдіяльності, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Науки, 72, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 908-59-89, e-mail: dolena.2017@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7970-8110

⁴ Кафедра безпеки життєдіяльності, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49000, Дніпро, Україна, e-mail: zltkelena@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2482-7574

⁵ Кафедра безпеки життєдіяльності, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49000, Дніпро, Україна, e-mail: Juliya.voytenko.1983@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0819-3794

Анотація. Постановка проблеми. Відходи промислових виробництв часто можуть стати основною сировиною для виготовлення будівельних матеріалів спеціального призначення. Використання таких відходів є запорукою збереження екосистем та зниження фінансування для проведення ремонтно-будівельних робіт на ЧАЕС. **Мета роботи:** визначення якісних характеристик, зокрема морозостійкості та водопоглинання, зразків будівельних матеріалів із осадів стічних вод на міських очисних спорудах та вторинного поліпропілену, визначення основних етапів підготовки сировини та виготовлення будівельної продукції. **Методика.** В роботі використовувались методи математичної обробки даних для визначення оптимального складу осадів стічних вод та поліпропілену у сировинних сумішах для виготовлення будівельних блоків спеціального призначення. **Наукова новизна.** В роботі пропонуються нетрадиційні сировинні компоненти для виготовлення будівельних блоків, проводиться оцінка їх співвідношення для забезпечення найвищих показників морозостійкості та оптимальних показників водопоглинання. Встановлено, що експериментальні зразки блоків за результатами перевірок не поступаються за вказаними параметрами іншим аналогам, що виробляються із традиційної сировини. **Практична значимість.** Використання відходів значно здешевлює проведення ремонтно-будівельних робіт та дозволяє зменшити, а потім провести роботи з ремедіації на територіях їх традиційного розміщення – мулових картах. **Результати.** Для впровадження вказаних технологій розраховані сировинні витрати, визначені витрати теплоти, температури, час нагрівання сировинних сумішей, час охолодження будівельних виробів. Оптимальними співвідношеннями осадів стічних вод до поліпропілену є 65–70 % (масова частка): 35–30 % (масова частка), що забезпечує найвищі показники морозостійкості та оптимальні показники водопоглинання.

Ключові слова: цивільний захист; безпека життєдіяльності; відходи; вторинні ресурси; будівельні матеріали; морозостійкість; водопоглинання; поліпропілен

Problem statement. The Chernobyl disaster, unfortunately, had a large-scale impact on the environment. And even today, work continues on monitoring and implementing measures to protect the territories in the area of influence of the destroyed reactor. A sarcophagus is built above the reactor, which serves as a protective structure and protects the environment from radiation. At the same time, when the service life of the sarcophagus will have passed, the structure needs to be replaced and related construction and restoration work.

In addition, in the modern world, due to the needs of mankind, the production and consumption of plastic products is constantly increasing, which leads to the formation of large volumes of non-degradable waste. Most plastic containers and products in our country are taken to landfills that occupy large areas.

It should be borne in mind that today there are technologies for the processing of plastic waste and its reuse in the production of containers or other plastic products.

Technologies for the disposal of plastic in the production of building materials are developing.

The use of waste for construction and restoration works under the conditions of their high-quality monitoring solves several important problems, namely, it reduces the cost of construction work, ensures the safety of the territory that has undergone significant radiation exposure, and creates prerequisites for waste disposal.

Analysis of publications. A huge number of world scientific periodicals still cover the problem of the Chernobyl disaster. In particular, in the articles [1–3] the problems of contamination of territories and ecosystems are investigated. In the articles [4–5] the information about the construction of a sarcophagus over the reactor that exploded is given.

A decrease in funding for construction and repair work in the Chernobyl NPP zone and replacement of the sarcophagus at the end of its service life will be facilitated by a decrease in the price of building materials, which can be

ensured by the use of waste as raw materials in the manufacture of building materials. The authors consider the possibility of using secondary thermoplastic and sewage treatment sludge to obtain building materials for special use.

The articles [6–7] provides information on the use of plastic in the construction industry. Trending research on using of post-consumer plastics in the production of wood-plastic composites for building components are shown in the article [8].

In the articles [9–10] The possibility of using thermoplastic and wastewater treatment waste to produce building blocks is shown.

Purpose of the work. The main purpose of the work was to determine the quality characteristics, in particular frost resistance and water absorption, of samples of building materials from sewage sludge and secondary polypropylene, to determine the main stages of raw material preparation and production of construction products.

Methodology. The work used methods of mathematical data processing: the values of frost resistance and water absorption for samples of building blocks with different ratios of raw materials were evaluated and compared. The optimal composition of sewage sludge and polypropylene in raw material mixtures for the manufacture of special-purpose building blocks was determined.

Results. In the course of research, the possibility of obtaining building materials from sewage sludge was confirmed, as well as the technology for their manufacture was developed.

Polypropylene (PP) is used to bind fine precipitates. PP waste is purchased from the enterprises that generate it.

Technologies for the manufacture of plastic and concrete blocks are based on the property of molten PP to melt at relatively low temperatures and quickly solidify when these temperatures decrease. When heated and mixed, small fractions of sewage sludge combine with molten masses of PP. Depending on the ratio of sewage sludge and PP waste, paste-like suspensions are formed, from which plastic blocks or artificial crushed stone are formed, which, when cooled,

is used as an aggregate in the formation of blocks.

The process of manufacturing building materials using sewage sludge and PP waste includes the preparation of raw materials, mixing of raw materials in the required ratios, thermal heating of mixtures – at this stage, artificial crushed stone or a viscous mixture is produced for the formation of blocks, the formation of blocks.

When PP is heated above the melting point, volatile products of thermo-oxidative destruction may be released into the air. Therefore, it is important to strictly observe the temperature regime during the experiment and when providing production work.

For technologies of the manufacture of building blocks (concrete), preliminary mechanical dewatering of sewage sludge is provided, if they have not been previously dehydrated on silt maps or in another way, which is aimed at reducing energy costs during thermal heating of sludge. Sewage sludge generated at sewage treatment plants has a high humidity: 95–99 %. Their use under such conditions requires high energy costs for water evaporation, therefore it is economically unprofitable.

Today, wastewater treatment plants are actively implementing sludge dewatering methods. The most popular and economically justified among them are mechanical methods.

The most efficient equipment in this case is filter presses and centrifuges. However, centrifuges are more energy-intensive compared to filter presses. Therefore, the latter are recommended for use.

Grinding of PP during the experiment was carried out manually. The dependence of the heating time of raw material mixtures on the size of crushed polyethylene particles was checked.

During the experiment, PP was crushed to a particle size of 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 mm.

Mixing sewage sludge and plastic before they are heated is aimed at increasing the area of contact of interacting substances and helps to improve the binding process.

The building blocks are formed by vibropressing in a vibropress.

The dependencies of frost resistance and water absorption of building materials on the mass fraction of sewage sludge in the raw material mixture are shown in Fig. 1, 2. The consequence of heat treatment of sewage sludge

will be the destruction of pathogenic microorganisms, in particular, bacteria of the *Escherichia coli* group, contained in freshly formed sewage sludge.

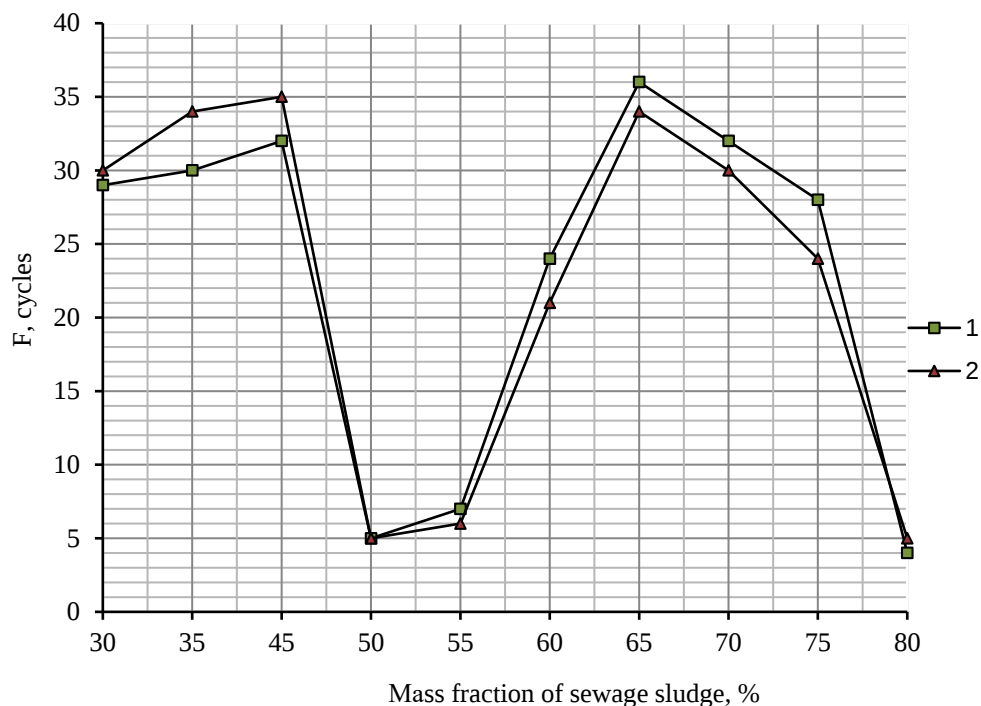


Fig. 1. Dependencies of frost resistance of building materials on the mass fraction of urban wastewater sludge in the raw material mixture: 1 – sewage sludge dehydrated 5–10 years ago; 2 – sewage sludge dehydrated 10–15 years ago

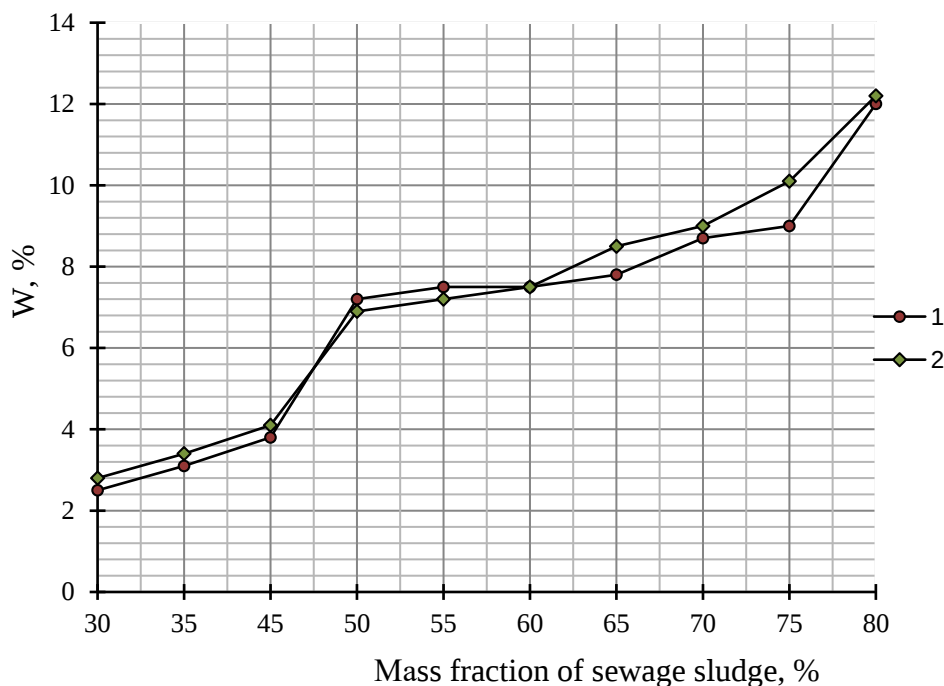


Fig. 2. Dependencies of water absorption of building materials on the mass fraction of urban wastewater sludge in the raw material mixture: 1 – sewage sludge dehydrated 5–10 years ago; 2 – sewage sludge dehydrated 10–15 years ago

The frost resistance of blocks with a mass fraction of sediments of 35–45 % in the raw material mixture is about 30 cycles. With an increase in the proportion of sewage sludge in the raw material mixture, brittle pebbles are formed, which have low strength, which causes a sharp decrease in the frost resistance of products.

With a further increase in the mass fraction of sediments and reaching 65–70 %, frost-resistant crushed stone is formed. A more detailed description of the dependence of the frost resistance of crushed stone on the mass fraction of sewage sludge in the raw material mixture is given in Figure 1.

A microbiological analysis of sewage sludge was carried out with the determination of the LCP and ZMC indices and a significant excess of the norm for the content of *Escherichia coli* bacteria in the freshly formed sewage sludge was revealed.

Considering that metals and some chemical compounds are contained in sewage sludge in concentrations higher than the regulated normative values for the content of these substances in soils, there is a danger of their entering the soil and groundwater, since contaminated sludge is in direct contact with the soil, which necessitates the development of a technology for the disposal of these wastes.

Table 1

Main characteristics of building blocks

Name of indicators	Characteristics of building blocks
Color	Black or other when chemical dyes are added
Density, kg/m ³	1 100–1 500
Strength, kg/cm ²	50–100
Frost resistance	F25– F50

For the implementation of these technologies, raw material costs have been calculated, heat costs, temperatures, heating

time of raw material mixtures, and cooling time of construction products have been determined.

Table 1 shows the main characteristics of building blocks from sewage sludge and PP.

Table 2

Dimensions and weight of building blocks

Name of indicators	Characteristics of building blocks
Nominal dimensions, mm	390:190:188
by length	+–3
by width	+–3
by thickness	+–4
product weight, no more than, kg	20
deviation of the ribs from straightness and edges from flatness, no more than, mm	+–3
deviation of the side and end faces from perpendicularity, no more than, mm	+–2

The dimensions and mass of building blocks are shown in Table 2.

Conclusions

For the manufacture of blocks with sufficient strength, frost resistance and low water absorption, it is necessary to use a raw material mixture with a mass fraction of wastewater sludge of 35–45 %. For the implementation of these technologies, raw material costs are calculated, heat and temperature costs, heating time of raw material mixtures, cooling time of building products are determined. It has been determined that the experimentally produced samples of blocks according to the results of practical tests are not inferior in frost resistance and water absorption to other analogues produced from traditional raw materials. They are recommended to be used in construction, restoration and construction work in order to ensure safety in the exclusion zone.

REFERENCES

1. Talerko N. Reconstruction of 131I radioactive contamination in Ukraine caused by the Chernobyl accident using atmospheric transport modelling. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2005, vol. 84 (3), pp. 343–362. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.04.005>
2. Talerko N. Mesoscale modelling of radioactive contamination formation in Ukraine caused by the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2005, vol. 78 (3), pp. 311–329. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.04.008>

3. Beresford N.A., Fesenko S., Konoplev A., Skuterud L., Smith J.T. and Voigt G. Thirty years after the Chernobyl accident : What lessons have we learnt? *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016, vol. 157, pp. 77–89. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.02.003>
4. Chernobyl : From Accident to Sarcophagus. Producing Power. Pp. 136–169. URL: <https://doi.org/10.7551/mitpress/9229.003.0009>
5. Pretzsch G., L’Homme V., Seleznev A.N. and Seredynin E.S. The Chernobyl Sarcophagus Project of the German-French Initiative. Role of GIS in Lifting the Cloud Off Chernobyl. 2002, pp. 85–95. URL: https://doi.org/10.1007/978-94-010-0518-0_7
6. Agarwal S. and Gupta R.K. Plastics in Buildings and Construction. *Applied Plastics Engineering Handbook*. 2017, pp. 635–649. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-39040-8.00030-4>
7. Acuña-Pizano H., González-Trevizo M.E., Luna-León A., Martínez-Torres K.E. and Fernández-Melchor F. Plastic composites as sustainable building materials : a thermal and mechanical exploration. *Construction and Building Materials*. 2022, vol. 344, pp. 128083. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128083>
8. Ribeiro L.S., Stolz C.M., Amario M., da Silva A.L.N. and Haddad A.N. Use of Post-Consumer Plastics in the Production of Wood-Plastic Composites for Building Components : a systematic review. *Energies*. 2023, vol. 16 (18), pp. 6549. URL: <https://doi.org/10.3390/en16186549>
9. Levytska O., Dolzhenkova O., Sichevyi O. and Dorhanova L. Masonry Unit Manufacturing Technology Using Polymeric Binder. *Chemistry & Chemical Technology*. 2020, vol. 14 (1), pp. 88–92. URL: <https://doi.org/10.23939/chcht14.01.088>
10. Levytska O., Trus I., Gomelya M. and Alekseyenko S. Technology of Utilization of Polypropylene Waste and Wastewater Sediments by Production of Building Blocks. *Ecological Engineering. Environmental Technology*. 2022, vol. 23 (2), pp. 50–59. URL: <https://doi.org/10.12912/27197050/144995>

Надійшла до редакції: 21.08.2025.

УДК 69.001.5

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.051125.152.1203

ІННОВАЦІЙНИЙ ПРОЄКТ БУДИНКУ З ВПРОВАДЖЕННЯМ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ

САВИЦЬКИЙ І. Д.¹, студ.,
РОТТ Н. О.^{2*}, канд. техн. наук, доц.,
МАЦЮК І. М.³, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», вул. Дмитра Яворницького, 19, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: savytskyi.i.d@nmu.one

^{2*} Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», вул. Дмитра Яворницького, 19, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: rott.n.o@nmu.one, ORCID ID: 0000-0002-3839-6405

³ Кафедра конструювання, технічної естетики і дизайну, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», вул. Дмитра Яворницького, 19, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: matsiuk.i.m@nmu.one, ORCID ID: 0000-0002-0861-0933

Анотація. У статті представлено концепцію інноваційного житлового об'єкта, спроектованого відповідно до принципів екологічності, енергоефективності та сталого розвитку. Запропоновано архітектурно-інженерну модель, що передбачає комплексну інтеграцію автономних систем водо-, енерго- та теплопостачання. До таких технологій входять система теплообміну для водопостачання, збирання та багаторівнева фільтрація дощової води, біореактор для переробки органічних відходів із виділенням метану, вентиляційна система з рекуперацією тепла, а також використання сонячних колекторів для виробництва електроенергії та тепла. Просторове розміщення комунікацій та інженерних мереж базується на принципах оптимізації природних енергопотоків, врахуванні орієнтації будівлі відносно сторін світу, а також архітектурної логіки планування приміщень. Загальною метою є мінімізація залежності від зовнішніх джерел енергії, зниження експлуатаційних витрат і демонстрація практичної реалізації сучасних енергозберігаючих та екологічно відповідальних технологій у житловому середовищі. **Мета статті** – полягає в розробці та обґрунтуванні моделі екологічного індивідуального житлового будинку з високим рівнем автономності та глибокою інтеграцією енергоефективних і водозберігаючих систем, що забезпечують довгострокову сталість і суттєве зниження навантаження на централізовану інфраструктуру. **Висновки.** У ході виконання дослідження було підтверджено ефективність інтеграції сучасних екотехнологій як у проектування, так і в практичну експлуатацію житлового будинку. Розроблена модель екобудинку демонструє значне зниження загального енергоспоживання, нижчий рівень шкідливих викидів та раціональніше використання наявних природних ресурсів порівняно з традиційним житловим будівництвом. Запропонований проєкт підтверджує реальну життєздатність та актуальність екожитла в Україні й доводить доцільність його впровадження як одного зі стратегічних напрямів сталого розвитку. У подальшому доцільно розширити сферу дослідження, включивши розробку подібних концепцій для багатоповерхових житлових будинків, а також провести детальний аналіз соціально-економічних наслідків і потенційних вигід від масштабного переходу до екологічно стійких житлових рішень.

Ключові слова: екологічне будівництво; енергоефективність; автономні системи; біогаз; рекуперація; дощова вода; сонячна енергія

INNOVATIVE BUILDING PROJECT WITH THE IMPLEMENTATION OF ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES

SAVYTSKYI I.D.¹, Stud.,
ROTT N.O.^{2*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
MATSIUK I.M.³, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

¹ Department of Engineering and Generative Design, Dnipro University of Technology, 19, Dmitry Yavornitsky Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: savytskyi.i.d@nmu.one

^{2*} Department of Engineering and Generative Design, Dnipro University of Technology, 19, Dmitry Yavornitsky Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: rott.n.o@nmu.one, ORCID ID: 0000-0002-3839-6405

³ Department of Engineering and Generative Design, Dnipro University of Technology, 19, Dmitry Yavornitsky Ave., Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: matsiuk.i.m@nmu.one, ORCID ID: 0000-0002-0861-0933

Abstract. The article presents the concept of an innovative residential facility designed in accordance with the principles of environmental friendliness, energy efficiency, and sustainable development. An architectural and engineering model is proposed that involves the comprehensive integration of autonomous water, energy, and heat supply systems, including technologies such as heat exchange water supply systems, rainwater collection and multi-stage filtration, a bioreactor for organic waste processing with methane release, a ventilation system with efficient heat recovery, and solar energy collectors for both electricity and thermal energy generation. The spatial arrangement of utilities and engineering networks is based on principles of optimizing natural energy flows, taking into account the orientation of the building relative to the cardinal directions, and aligning with the architectural logic and functionality of the internal layout. The overarching goal is to minimize dependence on external energy sources, reduce operational costs, and demonstrate the practical feasibility of implementing advanced energy-saving and environmentally responsible technologies in a residential setting. **The purpose of the article** is to develop and validate a model of an ecological individual residential building with a high degree of autonomy and a comprehensive integration of energy-efficient and water-saving systems that ensure long-term sustainability and a significant reduction in the load on centralized infrastructure. **Conclusions.** During the research, the effectiveness of integrating modern eco-technologies into both the design and practical operation of a residential building was confirmed. The developed eco-house model demonstrates a significant reduction in overall energy consumption, lower levels of harmful emissions, and a more rational use of available natural resources compared to conventional residential construction. The proposed project proves the real-world viability and relevance of eco-housing in Ukraine and confirms the feasibility of its implementation as one of the strategic directions of sustainable development. In the future, it is advisable to expand the scope of research to include the development of similar concepts for multi-storey residential buildings and to conduct a detailed analysis of the socio-economic impacts and potential benefits of a large-scale transition to environmentally sustainable housing solutions.

Keywords: *ecological construction; energy efficiency; autonomous systems; biogas; recuperation; rain water; solar energy*

Постановка проблеми. Сучасні тенденції індивідуального житлового будівництва все більше орієнтовані на енергоощадність, екологічність та автономність [1]. На тлі зростання вартості ресурсів, глобальних кліматичних змін та підвищення екологічної свідомості, зростає попит на технологічно адаптовані будівельні рішення [2]. Однією з інноваційних відповідей на ці виклики є екобудинки – житлові споруди, що мінімізують використання природних ресурсів, інтегрують повторне використання матеріалів і енергії та мають незначний вплив на довкілля протягом усього життєвого циклу.

Представлена робота ґрунтується на системному підході до формування концепції екологічного житла, що передбачає взаємопов’язане функціонування низки автономних інженерних систем. У процесі проєктування враховано як функціонально-планувальні особливості, так і кліматичні умови з урахуванням інсоляції та циркуляції повітря.

Аналіз публікацій. У науковій та технічній літературі представлено широкий спектр рішень для екологічного домобудівництва: від впровадження

сонячних панелей і систем вентиляції з рекуперацією до збору дощової води та біологічної переробки органічних відходів [3; 4]. Проте більшість з них акцентують увагу лише на окремих технологіях, тоді як інтегративні комплексні рішення залишаються недостатньо опрацьованими, особливо в контексті індивідуального будівництва.

У світовій практиці зростає роль добровільної екологічної сертифікації, зокрема за стандартами Green Building Initiative (GBI). Цей підхід базується на принципах енергоефективності, водозбереження, оптимізації внутрішнього середовища, вибору екологічних матеріалів і зменшення впливу на довкілля протягом усього життєвого циклу будівлі. GBI надає оцінку проєкту за цілою низкою критеріїв, що дозволяє інтегрувати сталий підхід на ранньому етапі проєктування. І хоча в Україні ця сертифікація ще не поширена, її принципи були орієнтиром у розробці цього проєкту.

Ще одним впливовим стандартом сталого будівництва є система сертифікації LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), що активно використовується в Європі, США та

поступово впроваджується в Україні [5]. LEED охоплює кілька напрямів оцінки: ефективність використання води й енергії, вибір матеріалів, якість повітря, транспортну доступність тощо. У контексті цього проєкту було враховано ряд принципів LEED: зменшення теплових втрат, рекуперація, повторне використання ресурсів, а також інтеграція місцевих екологічних матеріалів – як-от пінобетон та деревина.

Більшість проєктів, що згадуються в публікаціях, зосереджені на окремих аспектах екобудівництва: або на збереженні енергії, або на водоощадних технологіях [6; 7]. Водночас цілісні рішення, які поєднують кілька автономних систем в одному житловому просторі, залишаються рідкісними. Це відкриває простір для розробки комплексних рішень, адаптованих до конкретного планування та локальних умов [8].

Запропонована у статті модель спрямована саме на поєднання вже відомих технологій у єдину дієву систему в межах індивідуального житла [8; 9].

Окрім технологічних аспектів, проєкт також враховує вимоги екологічної сертифікації відповідно до міжнародних стандартів Green Building Initiative (GBI) та LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), що надає змогу впроваджувати системний сталий підхід до проєктування на ранніх етапах [10; 11].

Мета статті – полягає в розробці моделі екологічного індивідуального житлового будинку з комплексною інтеграцією енергоефективних та водоощадних технологій, що дозволяють суттєво зменшити залежність від централізованих інфраструктур.

Основні завдання роботи:

- інженерне моделювання систем тепло- та водозабезпечення з урахуванням потоків;

- розрахунок споживання водних і енергетичних ресурсів для домогосподарства;

- оцінка потенціалу автономного біогазового забезпечення;

- вибір конструкційних та теплоізоляційних матеріалів відповідно до екологічних критеріїв;

- визначення оптимального розміщення технологій з урахуванням орієнтації будинку та мікрокліматичних умов.

Виклад матеріалу. Проєктна концепція реалізована шляхом створення віртуальної моделі житлового будинку із застосуванням сучасного програмного забезпечення для архітектурного проєктування (SketchUp, AutoCAD, Revit). Було виконано інтегроване моделювання інженерних систем: тепло- та водозабезпечення, вентиляції з рекуперацією, сонячного електропостачання та переробки органічних відходів у біореакторі (рис. 1).

Для розрахунку тепловтрат та енергоспоживання використовувалися стандартні методики, зокрема згідно з ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель», а також рекомендації за методиками європейських енергоаудитів [12].

Основні матеріали, обрані для конструкції будинку наступні:

- CLT-панелі (cross-laminated timber) – як екологічно чиста альтернатива залізобетону;

- базальтова вата – для теплоізоляції зовнішніх стін;

- трисклінні енергоефективні вікна з інертним газом – для зменшення втрат тепла;

- фотовольтаїчні панелі на даху – для автономного живлення;

- система збору дощової води із багатоступеневою фільтрацією – для технічних потреб.

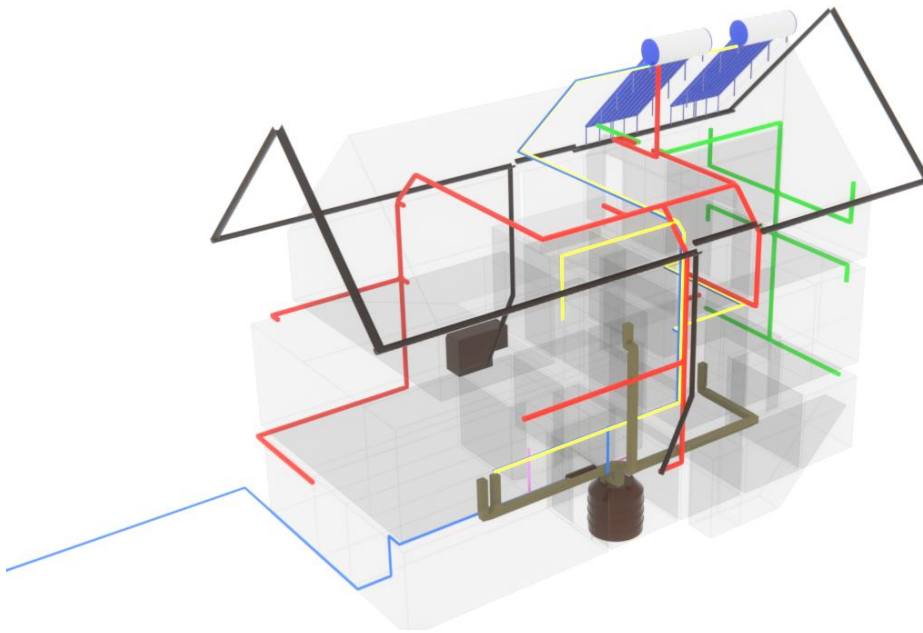


Рис. 1. Схема розташування інженерних систем екобудинку. Позначення: синій – холодна вода, помаранчевий – гаряча вода, мутно-зелений – біовідходи, зелений – свіже повітря, червоний – використане повітря, коричневий – водостік

Окрема увага приділялася орієнтації будинку відносно сторін світу з метою оптимального використання природної інсоляції. Південний фасад передбачає максимально відкрите скління, тоді як північний – мінімальні прорізи.

Система вентиляції побудована за принципом механічного повітрообміну з рекуперацією тепла, що дозволяє зменшити втрати до 70 % в опалювальний період.

Біореактор типу UASB (upflow anaerobic sludge blanket) дозволяє переробляти органічні побутові відходи у біогаз, який спрямовується для приготування їжі або обігріву.

Також було здійснено аналіз ефективності системи за сценарієм середньостатистичного домогосподарства з чотирьох осіб.

На основі архітектурного плану двоповерхового житлового будинку з підвалом було розроблено систему взаємопов'язаних інженерних рішень, орієнтованих на екологічність, енергоефективність та автономність. Кожен елемент системи інтегровано з урахуванням просторової логіки будинку, природного освітлення, напрямків повітряних потоків та руху води (рис. 2).



a



б

Рис. 2. Візуалізація будинку: а – у денний; у б – нічний час доби

Вхідна труба холодної води розташована ближче до підвального рівня, де одразу проходить через рекуператор, з'єднаний із каналізаційним стоком. У цьому теплообміннику частина тепла з використаної води передається холодній воді, що надходить ззовні. Далі ця вода підіймається трубопроводом на дах, де встановлені сонячні теплові колектори.

Колектори розташовані під оптимальним кутом (приблизно 35–40° для України), орієнтовані на південь, для максимальної інсоляції. Нагріта вода надходить у бак-накопичувач, звідки подається на кухню та до двох санвузлів. Передбачена система циркуляції, що забезпечує постійний потік гарячої води та швидкий доступ до неї без втрат енергії на повторний нагрів.

Покрівельна система сконструйована таким чином, щоб ефективно направляти опади у водостічну систему, з'єднану з підземним резервуаром. Вода проходить через фільтраційний блок (грубе очищення від листя, пилу, піску), після чого зберігається в ємності.

Зібрана вода використовується для поливу рослин, господарських потреб і технічного прибирання. У разі надлишку – надлишок зливається в дренажну систему. При необхідності можливе додаткове очищення для використання в туалеті.

У межах розробки систем водопостачання проаналізовано середнє водоспоживання родини з 3–4 осіб. Це дозволяє масштабувати об'єм ємностей та оцінити ефективність рекуперації та повторного використання (табл. 1).

Таблиця 1

Добове споживання рідини

Джерело споживання	Середній об'єм, л/добу
Душ/ванна	150–200
Змив туалету	100–150
Кухня (миття, приготування)	30–50
Прання	40–60
Полив/господарські потреби	20–40
Разом	340–500

Каналізаційні стоки з кухні та санвузлів спрямовуються до підвальної ємності з

анаеробними бактеріями. Система працює за принципом біореактора, де органіка

розкладається природними мікроорганізмами без доступу кисню. Цей процес не тільки зменшує об'єм відходів, а й утворює біогаз (переважно метан).

Для метану передбачено трубопровід, що підводить газ на кухню – для використання в газовій плиті або як резервне паливо. Об'єм метану невеликий, але він дозволяє частково зменшити споживання електроенергії.

За базового сценарію (лише побутові відходи) біогазова система покриває близько 38 % щоденних енергетичних потреб на

приготування їжі (табл. 2). Проте за умови додавання рослинних відходів із території (наприклад, трава після покосу, листя, обрізки рослин), обсяг органіки зростає до 6–7 кг/день. У такому випадку добова генерація метану може досягати $\approx 0,31 \text{ м}^3$ ($\approx 3,1 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$), що дозволяє покривати до 90 % потреб на приготування їжі. У зимовий період надлишки біогазу можуть бути використані для опалення приміщень або як резервне джерело енергії в умовах зниження сонячної генерації.

Таблиця 2

Оцінка потенціалу генерації біогазу

Параметр	Значення
Добовий обсяг органічних відходів	$\sim 3 \text{ кг}$
Добова генерація метану	$\approx 0,135 \text{ м}^3/\text{день}$
Енергетичний еквівалент метану	$\approx 1,35 \text{ кВт} \cdot \text{год.}/\text{день}$
Споживання електроенергії на готування	$\approx 3,5 \text{ кВт} \cdot \text{год.}/\text{день}$
Покриття потреб	$\sim 38 \%$ потреб на приготування їжі

У кожному приміщенні передбачена вентиляція з централізованим рекуператором повітря. Вентиляційна система розділена на припливну і витяжну, що дозволяє ефективно оновлювати повітря, одночасно зберігаючи тепло всередині приміщення.

Повітря, що виходить з приміщень, передає своє тепло повітрю, яке надходить ззовні. Це зменшує теплові втрати в осінньо-зимовий період і підтримує комфортну температуру в усьому об'ємі будинку. Крім того, ця система регулює вологість.

На південному схилі даху встановлено сонячні фотоелектричні панелі, які

генерують електроенергію для освітлення, побутової техніки та частково для обігріву. Передбачено встановлення акумуляторного блоку, що дозволяє накопичувати надлишок енергії для використання вночі або в хмарну погоду.

З урахуванням площі покрівлі $28,4 \text{ м}^2$, на якій встановлені панелі, та їхнього ККД (18 %), система здатна повністю покривати середньодобові енергопотреби в літній період, а взимку забезпечує базовий рівень електроенергії (табл. 3).

Таблиця 3

Розрахунок сонячної генерації електроенергії

Параметр	Значення
Коефіцієнт ефективності	18 %
Добова генерація влітку	$\approx 28,1 \text{ кВт} \cdot \text{год.}/\text{день}$
Добова генерація взимку	$\approx 10,2 \text{ кВт} \cdot \text{год.}/\text{день}$
Середнє добове споживання родини	8–10 кВт·год.

Будинок орієнтований так, що основні вікна виходять на південь. Це забезпечує

максимальне сонячне освітлення взимку. Північна сторона має мінімум вікон і

служить для технічних зон, що знижує теплові втрати.

Така організація простору дозволяє скоротити витрати на опалення та освітлення й водночас уникати перегріву влітку (через навіси або зелені насадження).

У результаті реалізації концепції екологічного будинку було розроблено

цифрову модель з інтегрованими системами енергоефективності.

Проведено порівняльний аналіз основних енергетичних і ресурсних параметрів між традиційним житловим будинком та запропонованим екологічним варіантом (табл. 4).

Таблиця 4

Порівняльна характеристика енергоспоживання та ресурсної ефективності

Показник	Традиційний будинок (еталон)	Екологічний будинок (проект)
Річне споживання електроенергії, кВт·год.	5 600	1 800
Річне споживання газу, м³	1 200	200
Кількість утилізованих органічних відходів, кг/рік	0	350
Виробництво біогазу, м³/рік	0	100
Збір дощової води, м³/рік	0	60
Витрати на енергоресурси, грн/рік	≈ 42 000	≈ 12 000
Викиди CO ₂ , т/рік	3,4	0,9

Згідно з розрахунками, екологічний будинок демонструє зниження енергоспоживання більш ніж у три рази, що обумовлено використанням фотовольтаїчних панелей, систем рекуперації та теплоізоляційних матеріалів нового покоління.

Застосування біореактора дало змогу утилізувати значну кількість органічних відходів, зменшуючи навантаження на місцеву систему поводження з ТПВ та додатково генеруючи біогаз.

Окрім того, система збору дощової води дозволяє щорічно замінювати до 60 м³ технічної води, що сприяє збереженню водних ресурсів. Загальні річні викиди CO₂ знижуються у понад 3,5 рази, що є суттєвим внеском у боротьбу з кліматичними змінами.

У процесі візуалізації проєкту було використано програмне забезпечення Blender 4.3.2. Для створення фотореалістичних зображень застосовувався рушій Cycles, який забезпечує точне відтворення матеріалів, освітлення та тіней. Для створення анімації використовувався Eevee – реальний рендерер, який дозволяє швидко отримувати якісні візуальні

результати з меншими витратами ресурсів. Завдяки цьому програмному забезпеченню вдалося представити об'ємну модель будинку з усіма інженерними елементами та наочно продемонструвати роботу систем у динаміці.

Висновки

У ході виконання дослідження було підтверджено ефективність інтеграції сучасних екотехнологій у проєктування та функціонування житлового будинку. Розроблений екологічний будинок демонструє значне скорочення енергоспоживання, зменшення шкідливих викидів та ефективніше використання ресурсів у порівнянні з традиційною забудовою.

Ключові результати:

- річне споживання електроенергії зменшено більш ніж утричі.
- викиди CO₂ скорочено майже у чотири рази.
- забезпечено автономне виробництво біогазу за рахунок утилізації органічних відходів.

- реалізовано систему збору дощової води, що сприяє збереженню прісної води.
- знижено витрати на енергоресурси на понад 70 %.

Таким чином, проєкт засвідчує реальну життєздатність концепції екологічного

житла в умовах України та доцільність її впровадження як одного з векторів сталого розвитку. У майбутньому доцільно розширити дослідження на багатоповерхові будівлі, а також проаналізувати соціально-економічний ефект від масового переходу до екодомобудівництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міненерго України. Енергетична стратегія України до 2035 року. URL: <https://mev.gov.ua/>
2. Швець О. Л. Енергонезалежні будинки в Україні : проблеми та перспективи. *Будівництво України*. 2022. № 5. С. 22–27.
3. Гринько А. С. Енергоефективні будинки: технології та перспективи. Київ : Либідь, 2020. 216 с.
4. Білоус І. М. Зелені технології в архітектурі: навч. посіб. Львів : Львівська політехніка, 2019. 148 с.
5. Центр екологічної сертифікації. Особливості сертифікації по стандарту LEED. URL: <https://mcl.kiev.ua/osobennosti-sertifikatsii-po-standartu-leed/> (дата звернення : 05.05.2025).
6. ArchDaily – архітектурний онлайн-ресурс. URL: <https://www.archdaily.com/> (дата звернення : 05.05.2025).
7. Budport. Будівельний портал України. URL: <https://budport.com.ua/> (дата звернення : 05.05.2025).
8. Ecotechnica – енергоефективні технології та альтернативна енергетика. URL: <https://ecotechnica.com.ua/>
9. Green Building Initiative – офіційний сайт організації. URL: <https://thegbi.org/>
10. International Energy Agency. Energy efficiency 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>
11. Міжнародна організація з відновлюваної енергетики (IRENA). Global Renewables Outlook-2022. URL: <https://www.irena.org/>
12. ДСТУ Б В.2.6-31:2021. Конструкції будинків. Теплова ізоляція будівель. [Чинний від 01.01.2022].

REFERENCES

1. *Minenerho Ukrainy. Enerhetychna stratehiia Ukrainy do 2035 roku* [Ministry of Energy of Ukraine. Energy Strategy of Ukraine until 2035]. URL: <https://mev.gov.ua/> (in Ukrainian).
2. Shvets O.L. *Enerhonzalezni budynky v Ukraini : problemy ta perspektyvy* [Energy-independent buildings in Ukraine : problems and prospects]. *Budivnytstvo Ukrainy* [Civil Engineering of Ukraine]. 2022, no. 5, pp. 22–27. (in Ukrainian).
3. Hrynko A.S. *Enerhoefektyvni budynky : tekhnologii ta perspektyvy* [Energy-efficient buildings : technologies and prospects]. Kyiv : Lybid Publ., 2020, 216 p. (in Ukrainian).
4. Bilous I.M. *Zeleni tekhnologii v arkhitekturi : navch. posib.* [Green technologies in architecture : a teaching aid]. Lviv : Lvivska Politehnika Publ., 2019, 148 p. (in Ukrainian).
5. *Tsentr ekolohichnoi seryfikatsii. Osoblyvosti seryfikatsii po standartu LEED* [Center for Environmental Certification. Features of LEED certification]. URL: <https://mcl.kiev.ua/osobennosti-sertifikatsii-po-standartu-leed/> (date of application : 05.05.2025). (in Ukrainian).
6. *ArchDaily – arkhitekturnyi onlain-resurs* [ArchDaily – architectural online resource]. URL: <https://www.archdaily.com/> (date of application : 05.05.2025). (in Ukrainian).
7. *Budport. Budivelniyi portal Ukrainy* [Budport. Construction portal of Ukraine]. URL: <https://budport.com.ua/> (date of application : 05.05.2025). (in Ukrainian).
8. *Ecotechnica – enerhoefektyvni tekhnologii ta alternatyvna enerhetyka* [Ecotechnica – energy-efficient technologies and alternative energy]. URL: <https://ecotechnica.com.ua/> (in Ukrainian).
9. *Green Building Initiative – ofitsiyni sait orhanizatsii* [Green Building Initiative – official website of the organization]. URL: <https://thegbi.org/> (in Ukrainian).
10. International Energy Agency. Energy efficiency 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023>
11. *Mizhnarodna orhanizatsiia z vidnovliuvanoi enerhetyky (IRENA)* [International Renewable Energy Agency (IRENA)]. Global Renewables Outlook-2022. URL: <https://www.irena.org/> (in Ukrainian).
12. *DSTU B V.2.6-31:2021. Konstruktsii budynkiv. Teplova izoliatsiia budivel. Chynnyi vid 01.01.2022.* [DSTU B V.2.6-31:2021. Building structures. Thermal insulation of buildings]. Effective from 01.01.2022. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 13.08.2025.

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»

Адреса редакції:

✉ 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 06.11.2025 р. Формат 60×84 1/8.

Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 10,00. Умовн. фарб.-відб. арк. 10,00.

Обл.-видавн. арк. 20,00. 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 06 November 2025. Format 60×84 1/8.

Digital printing. Conventional quire 10,00. Conventional colour imprints 10,00.

Publisher's signatures 20,00. Number of copies 50. Order 217